

# Examenvragen Experimentele Basistechnieken

**1.** What is the goal (doel) of sample (proef, object) conditioning (vorming) (è keuze van de objecten)?

- Het verbeteren van de voorwaarden van een observatie (vooral in nauwkeurigheid), door gebruik te maken van een specifieke samenstelling, grootte, vorm... van een object/voorwerp. Dit in een geoptimaliseerde omgeving.
- Het opzettelijk vergroten van het signaal om ongewenste effecten, ruis, artefacts (onbedoeld bijverschijnsel bij het opnemen van digitaal geluid)... te meten en/of tegen te gaan.
- Elk object heeft een specifieke vorm dat geoptimaliseerd word voor het doel van een bepaald experiment door gebruik te maken van de zuivering van het materiaal van het object, verrijking van isotopen, selectie van deeltjes van het nodige type, lading, spin...
- *Opm:* fysische, chemische en andere eigenschappen van structuren worden direct beïnvloed door de dimensie, vorm en grootte van het object. Dit moet steeds door de experimentalist nagegaan worden!

a. How can this achieved (Hoe kan dit bereikt worden)?

De vorming van het object door zijn atomaire samenstelling (isotopisch of chemisch) moeten voldoen aan

- De observatie van atomair transport
- Of de kenmerken van de omgevende tracer atoms (= bepalen gevolgde paden).

Dit kan door:

- § Verrijking van isotopen om aan selectieve massa-spectroscopie-analyse te doen;
- § Diffusion marker experiments (bv: isotope mass effect  $^1\text{H}$  à  $^2\text{D}$  à  $^3\text{T}$ );
- § Tracer experiments (massa, radioactief, magnetisch, verlichte...

b. Give examples:

Ø Het effect op de massa van een H-isotoop bij de vermindering van straling-geïnduceerde lading in een Si/SiO<sub>2</sub>/metaal structuur geeft aan dat de bewegende ladingen protonen (deutons) zijn.

Ø (bv. Van atomic tracer principle) Detectie van een lek in een vacuüm-systeem door gebruik te maken van He-gas. Door de combinatie van:

Δ Externe toevoer van He (door een buis vanuit een gasfles)

Δ En de detectie van He binnenin de vacuüm-kamer dmv een massa-spectrometer

2. What are the functions of excitation (opwekking, prikkeling) in physical experiment? Give examples from the practicum experiments:

a. *Het observeren van een object:*

De energie ( $\lambda$ ) van de gedetecteerde straling of het type van het deeltje zijn gelijk (of heel dicht in de buurt van) aan de energie van de eerste geëxciteerde bundel.

De observatie kan gedaan worden op verschillende manieren, afhankelijk van:

- △ Geometrie van de eerste bundel;
- △ Sample (staal);
- △ Detector gebruikt voor de observatie.

à reflectie;

à verstrooiing van EM-golven;

à diffractie;

à interferentie van EM- of elektron-golven.

b. *Het localiseren van het geanalyseerde object in de ruimte:*

Een scherp gefocuste elektronenbundel kan een object veel fijner waarnemen dan de resolutie-limiet van de conventionele optische instrumenten.

*Opm:* Dit is afhankelijk van  $\lambda$  van de geëxciteerde straling

c. *Energie-toevoer aan het geanalyseerde fysisch systeem bepalen door middel van:*

∅ EM-golven van verschillende  $\lambda$  kunnen zorgen voor de emissie van andere fotonen (= fluorescentie), elektronen (=fotoelektronen emissie), ionen of andere deeltjes van atomen of moleculen.

Afhankelijk van de keuze van het gedetecteerde type van emissie kunnen verschillende eigenschappen geanalyseerd worden:

△ Detectie van optische emissie: energieverval tussen de elektronenniveaus;

△ Fotoelektrische emissie: energieverdeling van de elektronen gemeten tov het vacuüm-niveau;

△ Ionische emissie: atomaire samenstelling

Bv. PES

∅ Deeltjes

= vrij analoog aan EM-golven

Verskil: Er bestaat een niet-0 elektrische lading dat kan botsen met de target sample, als analogie met het foton-geval.

è de efficiëntie van de energie-transfer is hoger bij deeltjes

Bv. AES

d. *Resonant excitation:*

Als de frequentie van het geëxciteerde signaal overeenkomt met de resonantiefrequentie, dan bereikt de amplitude van de trillingen hun maximum, zodat de observeerder deze frequentie kan bepalen en zo dus ook bepaalde kenmerken van het object.

e. *Voorbeelden vanuit de practica:*

i. 'Mechanical resonance': een verandering in de frequentie van een mechanische oscillatie wordt gebruikt om een variatie in massa te bepalen;

ii. 'Velocity and sound': bepaling van de snelheid van geluid in de lucht dmv resonant excitation van staande golven van een gekende lengte;

iii. 'Experiment of Melde': bepaling van de oscillatie-frequentie;

iv. 'Oscillations of a string': bepaling van de massadichtheid per eenheid lengte;

v. 'Conical oscillator': bepaling van de zwaartekracht-versnelling ( $= g$ ).

### **3**. Describe the basic principles of the photoelectron spectroscopy and the Auger electron spectroscopy. What information can be extracted from these measurements?

*Opm:* spectroscopie = de studie van de interactie tussen straling en materie als een functie van  $\lambda$ .

a. *Foton-elektron spectroscopie (PES):*

DOEL: bepaling van:

- Atomaire en chemische samenstelling van de sample;
- Bindingsenergie van de elektronen die erin zitten.

WERKING: als de foton-energie ( $hf$ ) groot genoeg is om al de elektronen van de K-schil te exciteren, zullen ze geobserveerd kunnen worden door een energie-analysator met een kin. Energie  $E_k$  = verschil tussen de foton-energie en de initiële energie van het elektron (tov Fermi-niveau van de analysator)

RESULTAAT: het energie-spectrum van de atomaire energie-niveaus:

IN EEN KRISTAL: energie-niveaus à energie-banden

è het fotoelektrisch spectrum bevat informatie over

- de chemische bindingen in de sample;
- en de structuur van de banden

b. *Auger electron spectroscopy (AES):*

*Opm:* voordeel van elektronenbundel: de bundel kan gemakkelijk gegenereerd en gemanipuleerd worden voor het gebruik in excitatie-bronnen

Het gebruik van de elektronenbundel om de energie van de basis-energie-niveaus te bepalen (zoals in foto-elektron spectroscopie) = onmogelijk,

WANT: na de excitatie van een tweede  $e^-$  zal het eerste  $e^-$  een ongekende fractie van zijn initiële energie kwijtspelen.

DUS: geen tweede elektronen gebruiken, maar enkel deze in overeenstemming met het **Auger proces**.

AUGER PROCES: de de-excitatie van een atoom met een gat in een basis-niveau.

Een elektron van een hoger energie-niveau gaat dit gat opvullen. De overdaad aan energie getransfereerd wordt naar het tweede elektron (= Auger-elektron), dat uitgezonden wordt uit het atoom.

ENERGIE VAN HET AUGER-ELEKTRON WORDT BEPAALD DOOR:

- De energie van de geïntialiseerde geïonsieerde schil;

- De energie van de schil waaruit een elektron naar de schil gaat met een gat (= vrije plaats);
- De energie van het schil vanwaar het Auger-elektron uitgezonden wordt

## 4. What physical principles can be applied to measure medium and large (from mm to km and longer) distances?

a. *medium distances: from mm to m:*

### **inductive displacement sensor:**

§ maakt gebruik van mutual inductance (wederzijdse inductie) tussen 2 of meer spoelen.

§ wet:  $V$  geïnduceerd in de 2<sup>de</sup> spoel is gerelateerd aan de verandering van  $I$  door de 1<sup>ste</sup> spoel via  $M$  (mutual inductance coefficient):

waarbij het teken afhangt van de richting van de winding in de spoel

§ Linear variable differential transformer (LVDT):

ü De ac-spanning, geïnduceerd in de 2 sec. spoelen, omv de primary stroom (met angulaire frequentie  $\omega$ )

ü Als: ferromagnetisch materiaal symmetrisch zich bevindt tss de 2 sec. spoelen, dan is  $M_1 = M_2 \Rightarrow V_{out} = 0$ ;

ü Een verschuiving van dit nul-punt leidt tot de verschijning van een  $V_{out}$  evenredig met de verplaatsing;

ü Het teken van  $V$  kan bepaald worden via de faseverschuiving (tov  $I_{primary}$ ), zodat zo de richting van de verplaatsing bepaald kan worden;



ü *opm:*

§  $f_{\text{meten}} > 10 f_{\text{resonantie}}$ ;

§ magnetische permeabiliteit van het ferromagnetisch  
materiaal is T-afhankelijk! è instabiliteit

ü Er wordt gebruik gemaakt van een normalisatie:

J simpele en betrouwbare sensor met goedkope elektronica;

## L er is mechanisch contact met het object nodig;

L grote afstanden kunnen niet gemeten worden, want de massa van de  
bewegende delen wordt onbetaalbaar groot;

L snelheid van de meting = beperkt door de mechanische resonantie van de  
LVDT.

### · **Non-contact methods:**

maakt gebruik van reflectie van licht afkomstig van het opp van een object

### · **laser interferometry:**

§ vergelijkt de fase van de gereflecterende bundel met die van de  
referentie bundel;

§ als het object beweegt, dan zal de interferentie van de bundels zorgen  
voor een veranderend patroon è verplaatsing kan bepaald worden via het  
maximum van de intensiteit bij interferentie:

§ via Michelson interferometer configuration:

J geen ijking nodig;

J geen direct contact met object;

J snelle metingen zijn mogelijk bij gebruik van een fotodetector.

L dure optica;

L afstanden  $< \lambda$ , zijn moeilijk te meten

· **laser triangulation:**

§ bepaling van de afstand tot het object via driehoeks-geometrie

§ toepassing: 3D-beelden van voorwerpen

b. *large distances: from m to many km:*

· **triangulation with long bases:**

§ maakt gebruik van de intrinsieke straling van een object;

§ via de hoek van de observatie kan de afstand tot het object

bepaald worden.

§ bv: in bepaalde telescopen en satellieten

· **laser echo:**

· versie 1:

gebruikt tijdsverval tussen de straling van een primary lichtpuls en de aankomst van de puls dat gereflecteerd wordt vanuit het object

Er geldt: , als er geen significant verval gedetecteerd wordt in het circuit

L lage intensiteit van het gereflecteerde signaal

· versie 2:

maakt gebruik van de faseverschuiving van het gereflecteerde licht in de eerste harmonische modulatie

Je kan gewerkt worden op radio-frequentie-schaal è de benodigdheden worden simpeler

bv. practicum: bepaling van c

## 5. What physical principles can be applied to measure small ( $\ll 1$ mm) distances?

### · **LASER INTERFEROMETER**

Levert metingen tot  $\lambda/4 \sim 0,1\mu m$  in het UV spectraalgebied. Kan worden gebruikt als er geen goedkope oplossing wordt gevonden.

Maar vooral kleinere afstanden ( $< 1nm$ ) vormen een uitdaging. Onderstaande oplossing zijn hierin succesvol.

### · **CAPACITEIT METING**

Gebruikt een het model van een condensator om de afstand  $x$  tussen het sample en een referentie ( geleidende elektrode) te meten.

$C = \frac{\epsilon\epsilon_0}{x}S$  , waarbij S de oppervlakte van de referentie elektrode is.

voordelen: hoge resolutie, geen mechanisch contact met sample

nadelen: voor hoge gevoeligheid is een grote S nodig, enkel geleidende samples kunnen worden gebruikt.

#### • **PIEZOELEKTRISCHE SENSOR**

Produceren een oppervlakte lading als ze vervormd worden door een mechanische kracht. Hierdoor ontstaat er een potentiaal verschil tussen beide kanten van het sample. De overeenkomstige spanning varieert benaderend lineair met de vervorming  $\Delta x$ . Namelijk  $\Delta V = k\Delta x$  . Zo kan het gebruikt worden om de variatie van de grote van het sample te meten.

De piezokristal kan zeer klein zijn, dit leidt tot een hoge frequentie van de intrinsieke mechanische resonantie. Dit levert snelle metingen op.

voordelen: zeer klein en snel, hoge gevoeligheid, simpele elektronica, goedkoop

nadelen: mechanisch contact, niet lineaire reactie,  
berekening nodig, 'vermoeidheids'verschijnselen van sample.

Er is nog een ander toepassing van de piezokristal in verband met het meten van kleine afstanden. Indien er spanning op het materiaal tussen 2 elektroden wordt gezet, zal de sample uitzetten of samentrekken. Zo kan men de ruimtelijke positie van een object op de kristal controleren tot op 0,01nm. Dit wordt gebruikt in de scanning microscopen om de 'tip van de naald' op de piezokristal te zetten. Met behulp van deze microscopen ( bv scanning tunneling, atomic force microscope) kan dan een 3D beeld gemaakt worden van en ongekend oppervlak met een nauwkeurigheid van 0,01 nm.

## **6. What physical principles are used for precise time measurements?**

Basis principe van tijd meten is het aantal standaard tijdseenheden in een interval meten. Die tijdseenheden moet geproduceerd worden door iets met een zeer stabiele frequentie. Bovendien hangt de nauwkeurigheid ook samen met de standaard tijdseenheid, het is dus

noodzakelijk een systeem met een hoge frequentie van intrinsieke oscillaties.

## **· QUARTZ CRYSTAL OSCILLATOR**

Maakt gebruik van het piezoelektrisch effect. Na vervorming raakt het kristal ( $\text{SiO}_2$ ) gepolariseerd en dit leidt tot een potentiaalverschil. Het kristal wordt opgenomen in een circuit. De eigentrilling van het kristal, bepaald door z'n vorm en eigenschappen, zorgt voor een constant variërende spanning in het circuit. Die spannings oscillaties met dezelfde frequentie als het kristal worden vergroot en terug gezonden naar het kristal. Dit zorgt voor een stijging van de amplitude van de intrinsieke trillingen van het kristal ( elektromechanische resonantie). Afhankelijk van de vorm, kan men frequenties tussen de 30kHz en de 60MHz produceren.

Hoewel er materialen zijn met een hogere piezoelektrische coëfficiënt  $k$ , kiest men toch voor kwarts. Redenen hiervoor:

- het is robuust
- hoge Young modulus (zodat hoge frequenties, dus grote nauwkeurigheid mogelijk is)

- stabiel materiaal ( geen last van achteruitgang, 'vermoeidheidsverschijnselen)
- thermische expansie coëfficiënt is zeer klein.

## **ATOMIC CLOCKS**

Hebben een veel grotere nauwkeurigheid, doordat ze hogere frequenties ( bvb  $Rb^{87}$  met  $6 \cdot 10^9$  Hz ) gebruiken bijbehorend bij elektronen overgangen.

Principe: Licht van een Rb ontladingslamp wordt door een cel met Rb-gas gestuurd. Indien de radiofrequentie spanning op de cel overeenkomt met de resonantiefrequentie van Rb zal de intensiteit van het licht afnemen met ongeveer 0,1%. Door de radiogolven te moduleren naar het laag frequentiegebied kan men de resonante absorptie detecteren. Het signaal wordt vergroot en teruggestuurd naar het controle circuit. Zo krijgt men dan 10MHz frequenties.

voordelen: bieden betere stabiliteit, aangezien de energie uit elektronenniveaus ongevoelig is voor de snelheid van het atoom in het gas en ongevoelig voor temperatuursvariaties.

nadelen: atomic clocks zijn veel ingewikkelder dan de kwarts oscillator.

# 7. What physical principles can be applied to measure mass, force, deformation?

## 7.1 Massa

De mechanische methode om te wegen is een onbekende massa te vergelijken met een gekende. Er zijn ook andere methodes

- **WEIGHT-INDUCED DISPLACEMENT**

Hier wordt gebruik gemaakt van het piezoelektrische vervorming. Men meet de geïnduceerde spanning door gewicht als mechanische kracht.

- **QUARTZ MICROBALANCE** ( voor zeer kleine massas)

De frequentie  $f$  van een kwarts kristal zal afnemen bij toename van massa:  $\frac{f}{f_0} = \sqrt{\frac{m}{m + \Delta m}}$ . Als de initiële frequentie hoog is ( $10^7$  Hz) kan er een zeer hoge gevoeligheid worden bereikt,



aangezien er de frequentieshift kan gemeten worden met een nauwkeurigheid van 1 HZ.

nadeel: temperatuursgevoeligheid ( verwarmen van het kristal leidt tot thermische expansie en dus afname van de frequentie).

- **GRAVITATIONAL PERTURBATION** ( in de astronomie)

Massa wordt geschat met behulp van de zwaartekracht storing door andere hemellichamen.

- **BIJ GELADEN DEELTJES**

Massa kan bepaald worden met de (q/m) verhouding in massa spectroscopy experimenten.

of

Kan bepaald worden door de straal van de baan te bepalen van het deeltje ( met gekende energie) in een extern magnetisch veld.

## 7.2 Kracht en vervorming

2 verschillende benaderingen

- door verkregen afbuiging te meten.
- met behulp van het piezoelektrisch effect, wat resulteert in variatie van de elektrische spanning.

## Vraag 8-10: zie vorig jaar (vraag 7-8 + pilot tube)

### 11. What are the principles of operations of electronic temperature sensors

Huishoudelijke oplossing: de thermische expansie thermometer. Gebaseerd op het fenomeen dat metaal uitzet bij hogere temperaturen.

voordelen: betrouwbaar, simpel, goedkoop

Nadelen: calibratie is

nodig, beperkt bereik en traag

**thermokoppel:** gebaseerd op het Seebeck effect: in een lus bestaande uit 2 stukken verschillende metalen draden, ontstaat een elektrische stroom als de twee juncties op verschillende temp. worden gehouden. Oorsprong van dit fenomeen ligt in de elektrondiffusie van het ene metaal naar het andere, wat zorgt voor een temperatuur afhankelijke contact potentiaal. 1 draad wordt onderbroken door een voltmeter:

$$V(\text{meter}) = V(\text{hotjunction}) - V(\text{coldjunction})$$

Om een absolute temperatuur te kennen moet 1 junctie dus op een

referentietemperatuur gehouden worden.(moeilijk) Modernere systemen gebruiken andere sensoren(RTD, thermistor) om de referentietemp. te bepalen.

Voordelen: zeer klein en licht en dus snel, erg duurzaam, zeer groot bereik

Nadelen: levert zeer kleine signalen(<10mV) wat leidt tot grote ruisgevoeligheid, onzekerheid op ref.temp. leidt tot extra onzekerheid op meting, aanwezigheid van warmtebron bij referentiejunctione sensor leidt tot overschatting van temp., onzuiverheden in metalen of legeringen(van thermokoppel) leidt tot mindere accuraatheid,

Opmerking: werken bij zeer hoge temp. levert 2 bijkomende problemen: hysteresis: gemeten voltage wordt afhankelijk van de voorgeschiedenis van de sensor

verval : hoge temp.

kunnen leiden tot oxidatie van metalen

**Thermistor** (thermally sensitive resistor): Wordt gemaakt uit halfgeleider oxides, thermisch gesinterd in een keramieken matrijs (mal) Meest gebruikte metalen: Mn, Ni, Cu, Co

Meest gebruikte vorm: een kraal met 2 draadjes. Wordt gebruikt voor temp. bij de kamertemperatuur of iets hoger.

Het werkingsprincipe bestaat uit de variatie in zijn weerstand veroorzaakt door temperatuur geïnduceerde veranderingen in de concentraties van de mobiele landingsdragers(positieve gaten of negatieve elektronen). thermische excitatie van de elektronen naar de halfgeleider geleidingsband resulteert in een grotere geleiding.  $R$ , zijnde omgekeerd evenredig met de geleiding, zal dalen als een exponentiële functie van de temperatuur.

Voordelen: zeer ongevoelig voor ruis, zeer gevoelig voor temp. veranderingen in een beperkt gebied (meestal rond kamertemperatuur, maar gebied kan verlegt worden)

Nadelen: moet aangedreven worden wat leidt tot zelfverhitting (oplossing: maximaal 1mA gebruiken, of stroom te laten vloeien enkel tijdens metingen), geen standaardnotaties (NIST) wat betekent dat calibraties en gefitte vergelijkingsparameters noodzakelijk zijn (probleem: verschillende thermistors kunnen verschillende resultaten leveren), erg broos en moet dus beschermd worden door metalen omhulsel wat ten koste gaat van de thermische responsiviteit

Opmerking: thermistor is een gemiddelde sensor: totale verandering van de weerstand wijst op een temp. die tussen de minimum en maximum temp. ligt over het element.

**RTD** (Resistive Temperature Detectors): gebaseerd op de temp. afhankelijkheid van de weerstand van metalen, die bepaald wordt door de verstrooiing van elektronen. Stijging van de temperatuur leidt tot een stijging en de elektron verstrooiing wat leidt tot een daling in de mobiliteit van de elektronen en dit resulteert in een grotere weerstand.

$R = R_0 (1 + aT + bT^2 + cT^3 + \dots)$  Voor nauwere T variatie (-100\_200) is de lineaire expressie voldoende, voor groter bereik is de parabolische expressie nodig. Meest gebruikte metaal is Pt omwille van de quasi lineaire temperatuur afhankelijkheid van R (mindere mate Ni, Cu, Ni-Fe)

Verschillende configuraties: met 2 draden , 3 of 4 (voor de hoogste accuraatheid)

Voordelen: accurater, stabiel en meer herhaalbaar dan thermokoppel elementen.

nadelen: erg delicaat, groter en dus trager, selfheating aangezien ze aangedreven wordt (oplossing: vermogen dat gedissipeerd mag worden voor accurate metingen is ongeveer 100uW)

Dit is opnieuw een gemiddelde sensor

**Pyrometer:** gebruikt bij zeer hoge temp ( $>400^{\circ}\text{C}$ ), gebaseerd op visuele vergelijking tussen het stralingsspectrum van het object en een lamp met wolfram draad (beide worden verondersteld gelijkend te zijn op het spectrum van een zwarte straler, waarvoor de aard van het spectrum volledig bepaald wordt door de temp.) Wanneer beide objecten dezelfde temp. hebben kan er geen contrast waargenomen worden in hun gesuperponeerde beelden en de temp. wordt dan gehaald uit de stroom gestuurd door de W draad

Voordelen: geen contact, zeer hoge temp.

Nadelen: slechte accuraatheid (1-2%), geen geautomatiseerd meetsysteem

## 12. What are the principles of operation of electronic pressure sensors

De vraag gaat over elektronische systemen, maar ik zal ook een korte samenvatting geven van de systemen die mechanisch werken of met capaciteiten of met piezo-elektrische sensors.

**Bourdon manometer:** gebruikt de verplaatsing (rotatie) van een c-vormige buis om de druk in de buis te meten. Voor vacuüm metingen gebruikt men 2 Bourdon elementen uit kwarts gedraaid in een helix waarbij de verplaatsing een spiegel laat roteren. 1 kant bevat een gesloten vacuüm en de andere kant is verbonden met het onbekende vacuüm.

**manometer:** bestaat uit een reservoir bestaand uit twee gedeeltes verbonden met elkaar en gevuld met een vloeistof. Het hoogte verschil in de vloeistof tussen beide gedeeltes wordt veroorzaakt door een drukverschil. (detecteer vacuüm tot 1mTorr)

**capaciteit manometer:** werkt door het meten van de verandering in de capaciteit, veroorzaakt door de beweging van een diaphragma relatief t.o.v. vastgehouden capaciteits platen. Des te hoger het vacuüm des te verder het diaphragma zich verwijderd van de vaste platen. (metingen tot  $10^{-5}$  Torr)

**Moleculaire impuls manometer:** een op een constante snelheid roterende rotor, propelleert de gasmoleculen van de gaskamer in een cilinder, waarbij de impact zorgt voor een verplaatsing van de cilinder evenredig met de getransfereerde energie. Dit is een manier om het aantal gasmoleculen in de kamer te bepalen. Omdat deze opstelling gasafhankelijk is, is een calibratie nodig.

**Viscose wrijving manometer:** bij hoog vacuüm hangen viscositeit en wrijving beide af van de druk en kunnen dus gebruikt worden om deze te zoeken. Men meet de deacceleratie van een bal die roteert in een magnetisch veld. De druk wordt dan bepaald door te kijken hoe lang het duurt voor de bal om van 425 tot 405 rotaties per seconde te gaan wanneer het vermogen uitgezet wordt.

**Gas thermische geleidbaarheid manometer:** de thermische geleidbaarheid van een gas verandert wanneer de druk in het vacuüm gebied (1mTorr) komt. Een element wordt opgewarmd door een constante bron en dit wordt geplaatst in een gas. De temperatuur van dit element is nu een functie van het omringend vacuüm. Op 2 manieren wordt warmte weggeleid: geleiding en straling. Vanaf ongeveer 1mTorr zal de geleiding met het gas wegvallen en is er enkel nog geleiding met de wanden en straling. Dit punt in de tijd kan men zien.

**thermokoppel vacuümmeter (T/C gauges):** gebruikt van 1Torr tot 1mTorr. Het gebruikt opnieuw thermische geleidbaarheid van een gas. de meter bestaat uit 2

elementen: een filament en een thermokoppel junctie. Stroom in het filament wordt constant gehouden waardoor deze opwarmt wanneer de druk verlaagt wordt door de steeds verbeterende thermische isolatie. (het gas verdwijnt, geen geleiding) de junctie meet de temp veranderingen. Met de juiste calibratie kan aan de curve gezien worden wat de druk is van het gas bij een bepaalde temp. Deze elementen zijn niet echt accuraat en worden meestal gebruikt als ruwe indicatoren.

**Pirani vacuüm meter:** De druk wordt hier bepaald door te meten hoeveel stroom er nodig is om een sensordraad op constante temp. te houden. Omdat ook hier de thermische geleidbaarheid voor elk gas anders is, is een calibratie vereist. (de metingen zijn lineair in het gebied  $10^{-2}$  -  $10^{-4}$  Torr en daarboven logaritmisch) Meer modernere systemen maken gebruik van 2 filamenten die gebruikt worden als de 2 armen van een Wheatstone brug. Het referentiefilament wordt gehouden in een gas met constante druk, terwijl het meetfilament in het te meten gas wordt geplaatst. Beide filamenten worden op constante temp. gehouden door een stroom door de brug. Het energie verlies uit het meetfilament wordt gedetecteerd en door een feedback circuit terug aan de vermogen bron gegeven. (deze modernere versie heeft een veel groter bereik:  $10$  -  $10^{-5}$  Torr

**Convectie vacuum meter:** In tegenstelling tot de voorgaande meters maakt deze meter enkel en alleen gebruik van de natuurlijke convectie in viscosse gassen om de hitte van het hete filament weg te halen. Dit is erg belangrijk bij drukken van 10 Torr tot 1 atmosfeer.

**Ionisatie vacuum meters:** deze meten vacuum door gebruik te maken van de stroom gedragen door de ionen in het gas dankzij de impact met elektronen. Er zijn 2 verschillende types:

Hot-cathode: de katode stuurt elektronen uit in het vacuum, waar zijn ionen creëren. De

pos. ionen worden versneld naar een collector waar ze een stroom creëren. De grote van de stroom is dan evenredig met de gasdichtheid of de druk. ( $10^{-2}$ - $10^{-10}$  Torr) ze worden voornamelijk gemaakt uit glas.

cold-cathode: elektronen worden gehaald uit een oppervlak door gebruik te maken van een zeer sterk elektrisch veld, terwijl een magnetisch veld de elek. deflecteert waardoor ze naar de anode spiraleren. Daardoor is de efficiëntie van het maken van ionen verhoogd. Een ander voordeel is dat geen gebruik wordt gemaakt van filamenten die kunnen uitbranden, leeggeraken (burn out).

## 13 how Works a Galvanometer

Dit is een elektronisch meetinstrument waarmee een elektrische stroom wordt omgezet in een verdraaiing van een meetnaald om zijn as waarmee de grootte van de stroom af te lezen is. Ze zijn zeer gevoelig voor het meten van de stroom ( $\mu\text{A}$ - $\text{mA}$ ). De eerste bestonden uit een verticaal opgestelde spoel met meerdere windingen van geïsoleerd koperdraad met in het middelpunt een horizontale kompasnaald. De werking is gebaseerd op de magnetische "wet Van Tangent": de stroomsterkte door de spoel is evenredig met de tangens van de draaiingshoek die de magnetische kompasnaald maakt in het magnetische veld van de spoel.

**tangent galvanometer:** deze gebruikt het aards magnetische veld als richtend koppel voor de kompasnaald. voor gebruik moest deze dus in de juiste richting geplaatst worden. nadeel is uiteraard dat de meting beïnvloed wordt door het aards magnetisch veld.

**Astatische galvanometer:** bestaat uit 2 volkomen gelijke magneetnaalden die evenwijdig maar tegengesteld gericht zijn. Hierdoor wordt de uitslag enkel beïnvloed



door de stroom door de spoel die slechts om 1 magneetnaald is aangebracht. (geen last meer van aards magnetisch veld)

**Spiegel galvanometer:** i.p.v. een kompasnaald gebruikt men een torsiedraad uit kwarts, met zeer kleine permanente magneten, met daaraan een zeer lichtgewicht spiegeltje. Doordat de afbuighoek van de lichtstraal 2 keer zo groot is als de verdraaiing van de spiegel, kan een zeer nauwkeurige en duidelijke aflezing bekomen worden.

**D'Arsonval galvanometer:** Door het geheel ook nog eens in een strek magnetisch veld te plaatsen, met bv. een permanente hoefijzermagneet, kan men de galvanometer ongevoelig maken voor elk uitwendig veld.

## 14. Hoe werkt een analoge ammeter?

*Shunt is een Engels woord dat ik niet correct kan vertalen. In deze context is omzeilen misschien de correcte term. Een shunt zorgt ervoor dat de stroom (deels) omheen een bepaald element in een circuit kan geleid worden. --In het Nederlands is het ook een*

*shunt(weerstand): <http://nl.wikipedia.org/wiki/Shuntweerstand> --*

Om kleine stromen ( $\sim \mu\text{A}$ ) te meten wordt een galvanometer (cf. vraag 13) gebruikt. De draadjes die gebruikt worden voor de spoel in de galvanometer zijn zeer fijn en zouden kapotgaan bij grotere stromen.

Een kleine aanpassing aan de galvanometer lost dit probleem op: schakel

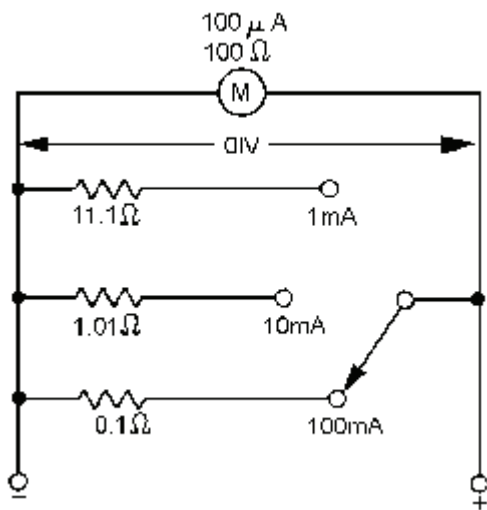
**een *shunt*, parallel, met de galvanometer**, en je krijgt een ammeter.

Die *shunt* is niets anders dan een draad met een lage weerstand. Dankzij

de lage weerstand passeert het grootste deel van de stroom door de *shunt*, en maar een klein deel gaat door de galvanometer.

De **stroom die gemeten wordt in de galvanometer is steeds evenredig de totale stroom**. De galvanometer duidt normaal gezien, op een afleesplaatje, de stroom door de spoel aan. Wanneer de getallen op dat aanduidplaatje vervangen worden door het product van 'het getal op het plaatje' met 'de evenredigheidsfactor', dan kan de totale stroom rechtstreeks afgelezen worden. Merk op dat de weerstand van zowel *shunt* als spoel gekend is, en daardoor ook de evenredigheidsfactor. Let op: het kan zijn dat bij grote stromen de *shunt* niet genoeg stroom trekt, waardoor de galvanometer kapot gaat (of te ver uitgerekt). De oplossing hiervoor is een *shunt* inbouwen met een lagere weerstand, zodat die meer stroom trekt.

Men kan ook een variabele ammeter maken door verschillende *shunts* in te bouwen, en dan met behulp van een schakelaar kiezen welke je in het systeem wil schakelen. (zie afbeelding hieronder)



Voor deze *shunt* is het belangrijk dat er een materiaal gebruikt wordt waarvan de weerstand weinig temperatuursafhankelijk is (bv. mangaan). Ander zou bij grote stromen de weerstand van deze *shunt* veranderen. Deze verandering van weerstand zou een verandering van de evenredigheidsfactor met zich meebrengen, waardoor de stroom niet meer correct kan afgelezen worden.

Een ammeter wordt best in serie geschakeld in het circuit. Bij een parallelschakeling zou er immers te veel stroom door de ammeter vloeien en die zo vernielen. Dit komt omdat een ammeter meestal een heel lage (totale) weerstand heeft in vergelijking met de rest van het circuit. Daarnaast moet er ook rekening gehouden worden met het feit dat de ammeter zelf het circuit kan beïnvloeden. Dit noemt men *meter-loading*. Dit is het feit dat de weerstand (aka *load*) van de ammeter groot genoeg kan zijn om de stroom door het circuit te beïnvloeden.

# 15. Hoe werkt een analoge voltmeter?

Om een voltmeter te maken kan alweer gebruikt gemaakt worden van de galvanometer. In principe zou men simpelweg een galvanometer parallel kunnen schakelen met de elementen waarover men de spanning moet meten. We weten dat over parallelle elementen eenzelfde spanning staat, dus dan staat de te meten spanning over de galvanometer. En deze spanning valt eenvoudig te bepalen: we kennen de weerstand van de spoel in de galvanometer, alsook de stroom. (De stroom is gekend omdat de uitwijking van de galvanometer evenredig is met de stroom!) Als de weerstand en de stroom gekend zijn, is ook de spanning gekend.

Het enige probleem is dat de weerstand van de galvanometer zo laag is, dat de stroom al snel te groot wordt voor de galvanometer, en die stuk zou gaan. De oplossing: schakel een **weerstand in serie met de galvanometer**. Deze weerstand zorgt ervoor dat de stroom door de galvanometer niet te groot wordt, waardoor de galvanometer blijft werken.

Omdat **de stroom door de galvanometer evenredig is met de spanning** over het te meten element, kan de spanning gemakkelijk rechtstreeks afgelezen worden.

Het is mogelijk om een variabele voltmeter te construeren door verschillende weerstanden in te bouwen, en dan met een schakelaar te bepalen welke je aan de galvanometer schakelt. (cf. de ammeter)

Ook hier is het belangrijk dat de weerstand die geschakeld werd niet temperatuursafhankelijk is. Daarnaast moet men er ook voor zorgen dat de voltmeter niet zorgt voor *meter-load*. Als de weerstand van de voltmeter te laag is zal die de waarde van de stroom door het circuit veranderen, en zo ook de spanning. (De voltmeter wordt dan een *shunt*.)

De sensitiviteit van een voltmeter is gedefinieerd als

$$\text{sensitiviteit} = \frac{R_{\text{spoel}} + R_{\text{ingebouwd}}}{\text{spanning bij maximale deflectie}}$$

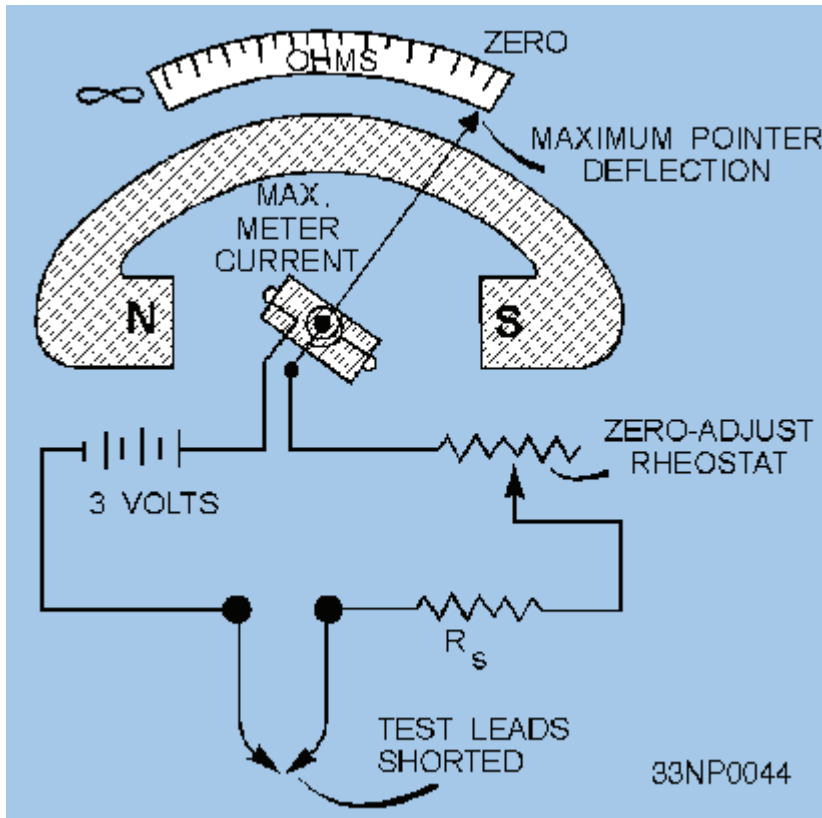
Maximale deflectie betekent dat de naald van de galvanometer niet verder kan, zonder de galvanometer te beschadigen.

Het is vrij logisch dat de sensitiviteit van de voltmeter afhangt van zijn weerstand, en ook van de 'rekkingcoëfficiënt' van de galvanometer. (Met rekkingcoëfficiënt bedoel ik: hoe gemakkelijk kan de spoel draaien in de galvanometer. Dit hangt af van het materiaal waarmee ze vastzitten.

Crappy uitleg, voor beter uitleg: zie vraag 13.)

Merk tot slot op dat de sensitiviteit gelijk is aan  $1/(\text{maximale stroom door galvanometer})$ .

## 16. Hoe werkt een ohmmeter?



Op de afbeelding hierboven staat een schematische voorstelling van de ohmmeter. Alweer wordt een **galvanometer gebruikt, maar deze keer in een iets ingewikkeldere schakeling**. De te meten weerstand moet normaal aan de pijltjes geschakeld worden. Wanneer de pijltjes aan elkaar gehangen worden zonder weerstand (hetgeen gelijk staat aan kotsluiten, of weerstand nul schakelen), dan vloeit er stroom door het circuit. Deze stroom zorgt voor de uitwijking van de galvanometer. Bij kortsluiting moet die nul weerstand geven. Moest dit niet zo zijn, dan kan de *zero-adjust rheostat* verschoven worden (dit is een schuifweerstand), totdat de galvanometer 0 aanwijst. Merk op dat bij nul weerstand de

uitwijking van de galvanometer maximaal is, en dat die uitwijking zal verkleinen bij het schakelen van een element met weerstand!

Het schakelen van een element (waarvan we de weerstand willen kennen) aan de 'pijltjes' is niet anders dan het schakelen van een extra weerstand in het circuit van de ohmmeter. De weerstand van het geschakelde element is evenredig met het verschil in stroomsterkte tussen het kortgesloten circuit en het circuit met weerstand. Misschien gemakkelijker in te zien in formulevorm:

$$R \sim I(\text{kortgesloten}) - I(\text{belast met weerstand } R)$$

Ook hier kan een variabele ohmmeter gebouwd worden door verschillende weerstanden en spanningsbronnen in te bouwen, en met een schakelaar te kiezen dewelke te gebruiken.

Wanneer de te meten weerstanden groot worden (een paar miljoen ohm), dan kan men geen batterij meer gebruiken om de spanning te leveren, omdat die spanning te laag is. De oplossing is een **megohmmeter**. Die werkt hetzelfde als een ohmmeter, buiten dat je handmatig de spanning opwekt door aan een wielte te draaien. (Zoals een dynamo op een fiets.)

## 17. How one measures ac current and voltage

# (electrodynamometer operation)?

De electro-dynamometer verschilt van de galvanometer in de zin dat er twee vaste "stroom-spoelen" gebruikt worden om een magnetisch veld aan te leggen, ipv twee permanente magneten. Er wordt ook een beweegbare "spannings-spoel" gebruikt. De stroomspoelen staan in serie geschakeld (en meten dus de stroom), de beweegbare spoel in parallel (en meet dus de spanning, doorgaans met een weerstand in serie...). Op analoge meters is aan de beweegbare spoel een naald bevestigd, waardoor een analoge aflezing mogelijk is. Een stroom vloeit door de stroomspoelen en creert een electromagnetisch veld rond de spoel. De sterkte van dit veld is evenredig met de aangeboden stroom, en staat ermee in fase. Dit veld wekt een stroom op in de beweegbare spoel, waardoor deze een kracht ondervindt door de twee vaste spoelen. De kracht is evenredig met het B veld opgewekt door de stationaire spoelen, en het B veld opgewekt in het beweegbare spoel (hier loopt immers ook een stroom door via de weerstand die in serie staat; het geheel parallel over het te meten circuit). Deze kracht wordt tegengewerkt door twee kleine veertjes. De evenwichtsituatie die tussen de drijvende kracht van het magnetisch veld en de tegenwerkende kracht van de veertjes



is een maat voor de te meten grootte. Het resultaat van deze opstelling is dat in een circuit, de uitwijking van de naald evenredig is met het gemiddelde product van spanning en stroom, wat bijgevolg een maat voor het echte ogenblikkelijke geleverde vermogen geeft. Afhankelijk van de load-karakteristieken, zal dit anders zijn dan het product van de stroom en de spanning verkregen door een voltmeter en een ammeter die apart geschakeld staan in hetzelfde circuit. Het voordeel van zo'n electro-dynamometer is dat deze niet richtinggevoelig is, en dus zowel in ac als dc circuits geplaatst kan worden.

## 18. What are the principles of operation of magnetometers?

### **Search-Coil Magnetometer**

Deze heel eenvoudige spoel- magnetometer is gebaseerd op de inductiewet van Faraday. Het geïnduceerde voltage in de spoel is evenredig met de veranderende magnetische flux door de spoel. Deze spanning creëert een stroom die evenredig is met de verandering van het magnetisch veld. Merk op dat deze magnetometer alleen werkt wanneer hij in een veranderend magnetisch veld geplaatst wordt (of wanneer deze

erdoor beweegt). Statische of heel traag veranderende velden kunnen enkel gedetecteerd worden door de spoel te laten ronddraaien of te oscilleren.

### **Hall effect magnetometer**

Het Hall-effect is een elektrische spanning die optreedt in de dwarsrichting van een stroomdrager als loodrecht op de stroom- en dwarsrichting een magnetisch veld aangelegd wordt. Dit komt omdat de Lorentzkracht een afwijking van de ladingsdragers veroorzaakt, waardoor positieve ladingsdragers naar een kant van geleider geduwd worden, en negatieve naar de andere kant. Dit zorgt ervoor dat er een spanningsverschil ontstaat. Een Hall effect magnetometer zal dit spanningsverschil meten, wat evenredig is met het magnetisch veld (indien de stroom door de geleider constant wordt gehouden)

Hall magnetometers kunnen een zeer hoge resolutie halen, maar zijn wel heel fragiel, en werken slechts een beperkte temperatuur range. Omdat het hall effect afhankelijk is van de ladingsdichtheid enz, is een goede calibratie nodig.

### **Fluxgate magnetometer**

De operatie van deze magnetometer is gebaseerd op de saturatie van twee ferromagneten, wanneer er een uitwendige hoge frequentie ac stroom door wordt gestuurd. 2 primaire spoelen staan opgesteld in tegengestelde richtingen, en in de afwezigheid van een extern magnetisch

veld is de totale magnetische flux door de secundaire spoel (die rond de twee ferromagneten zit) nul. Wanneer er nu een uitwendig magnetisch veld aangelegd wordt, zal het versterkt of afgezwakt worden, door de extern geïnduceerde velden in de ferromagneten. Dit zorgt voor een korte tijdsdift tussen de saturatie van de twee ferromagneten, waardoor er een korte puls ontstaat in de secundaire spoel, met een dubbele frequentie tov de aangelegde ac stroom. Deze puls wordt gemeten met lock in detectie. Hiermee kan een magnetisch veld tot op een microtesla gemeten worden. De voordelen van deze techniek is dat het goedkoop, snel en betrouwbaar is.

### **Nuclear magnetic resonance magnetometer**

Deze magnetometer maakt gebruik van de Larmor precessie van het magnetisch moment van een atoomkerndeeltje (bv proton in  $\text{H}_2\text{O}$ ) bij een uitwendig aangelegd magnetisch veld. Om deze precessie te observeren, worden er energieovergangen gestimuleerd, mbv radiogolven. Voor twee mogelijke spin orientaties zijn er twee overeenkomstige energieniveaus indien er een uitwendig magnetisch veld is. De lagere toestand (bv bij spin  $-1/2$ ) zal meer bezet zijn dan de hogere toestand (bij  $+1/2$ ), waardoor het sample geëxciteerd kan worden mbv resonantie: door er fotonen met de juiste energie op af te sturen. Aangezien het magnetisch moment gekwantiseerd is, zal er enkel resonantie optreden indien de fotonen de juiste golflengte hebben (dit zal meestal in het radiogebied zijn). De golflengte waarbij er excitatie optreedt, kan zeer nauwkeurig gemeten

worden, en kan onmiddellijk gebruikt worden om het magnetisch veld te bepalen.

Deze techniek hangt intrinsiek af van de eigenschappen van kernen, en kan dus gebruikt worden om andere magnetometers mee te calibreren.

### **SQUID= Superconducting Quantum Interference Device**

Deze bestaat een kleine supergeleidende ring, waarin twee verzwakte punten aangebracht zijn (josephson junctions). Door zo'n ring zal de magnetische flux gekwantiseerd zijn. Wanneer er een constante stroom door de ring gestuurd wordt, zal een verandering van magnetische flux leiden tot schommelingen van het voltage. Hieruit kan precies het aantal veranderingen van fluxkwantum berekend worden. Indien de oppervlakte van de ring gekend is, kan hieruit het magnetisch veld bepaald worden. Deze techniek is de meest nauwkeurige manier om het magnetisch veld te bepalen. Een nadeel ervan is dat deze alleen bij zeer lage temperaturen werkt, aangezien de ring supergeleidend moet zijn.

## 19. How one can measure intensity of electromagnetic radiation?

### **Thermische detectors**

Thermistor kan gebruikt worden om door de straling geïnduceerde temperatuur verandering te meten. Merk op dat de massa zo klein mogelijk gehouden moet worden, om een grote nauwkeurigheid te

bereiken. Speciale thermistors met zo klein mogelijke massa worden doorgaans bolometers genoemd. Andere temperatuur sensoren (zoals opeengestapelde thermocouples) of pyroelectrische elementen, kunnen ook gebruikt worden om variaties van temperatuur in de detector te meten, die direct gerelateerd zijn aan de intensiteit van de inkomende straling. De gevoeligheid van zulke detectors is voornamelijk gelimiteerd door thermische ruis. Aangezien deze evenredig met de temperatuur, worden thermische detectoren vaak zo hard mogelijk afgekoeld.

### **Electron emission detectors**

Indien de energie van inkomende fotonen voldoende hoog is, kunnen er elektronen uit het oppervlak van een electrode geslagen worden, wat resulteert in een elektrische stroom die een directe indicatie geeft van de intensiteit. Deze techniek is dan ook bijzonder handig om de intensiteit van hoogenergetische fotonen te meten. Vaak wordt deze meettechniek gecombineerd met een photomultiplier tube (zie vraag 20). Hiermee kunnen nauwkeurige stralingsdetectoren op kamertemperatuur gemaakt worden. Een andere uitbreiding hiervan is dit te combineren met scintillatoren (denk aan de muon detector in an3!). Dit maakt het mogelijk om ook de intensiteit van andere deeltjes te meten (muonen, alfa- en betastraling, enz.)

## 20. Describe operation of photon/particle multipliers.

De werking van de photon multipliers is gebaseerd op het photo-elektrisch effect. Wanneer namelijk fotonen invallen op een oppervlak, kunnen hier elektronen worden losgeslagen door het

photo-elektrisch effect. ( afhankelijk van het gebruikte materiaal waar het foton op invalt, kan dit tot 1 elektron/fotoninval oplopen ). Het losgeslagen elektron wordt bijgevolg versneld door een aangelegd potentiaalverschil van het eerste oppervlak naar een volgende dynode. Hier kan het foto-elektron ( = elektron dat is losgeslagen door een foton ) weer elektronen vrijmaken.

Op hun beurt worden deze elektronen versneld tot de volgende anode, waar de 'secondary electrons' ( = elektronen die vrijkomen, door andere elektronen ) opnieuw elektronen vrijmaken die...

Dit proces blijft zich herhalen en uiteindelijk wordt door soms slechts 1 foton zoveel elektronen vrijgemaakt dat het zorgt voor een meetbaar elektrisch signaal.

Figuren op pagina's 64 tot en met 66 in hoofdstuk 3 kunnen zeer verduidelijkend werken.

( de anodes en dynodes hoeven geen losstaande platen zijn, het kunnen ook slechts 2 platen zijn met een toenemende potentiaal in de richting van het invallende foton )

Enkele voorbeelden zijn

- de PMT ( = Photo Multiplier Tube ), waarbij het versterkingen mogelijk van van de orde  $10^7$  ( --> single photon count )

de PMT kan ook worden gebruikt om straling te dedecteren in de Scintillatie-detector. Hierbij worden hoge-energie fotonen op een gedopeerd NaI-kristal gericht,

dit kristal zorgt ervoor dat door recombinatie van het kristal, een foton van een andere golflengte wordt uitgezonden, dat kan opgemerkt worden door de PMT.

Door het aantal elektrische pulsen te tellen, kan men de intensiteit van de hoge-energie-foton-flux bepalen. (= meest gebruikte kamertemperatuur stralings detector! )

- de MCP ( = MicroChannel Plate ). Hierbij zijn verschillende PMT's naaste elkaar opgelijnd in een vlak, die voor een elektrisch signaal zorgen onderaan de MCP.

Signalen van Ionen of elektronen kunnen op dezelfde manier worden opgemeten, zoals de fotonen bij een MCP, of bij een enkelvoudig-kanaal versterker zoals de PMT.

GROOT VOORDEEL : Een versterkingscoëfficiënt van  $10^7$ , die ervoor zorgt dat zelfs maar 1 foton/elektron/ion kan worden geteld!

GROOT NADEEL : Vacuum versnellers eisen een hoge spanning die zeer stabiel moet zijn.

Ook zijn de oppervlakken waarvan de elektronen worden weggeslagen zeer gevoelig voor absorbtie van vreemde atomen,

waardoor de levensduur van een versterker zeer gelimiteerd is, wanneer hij aan lucht wordt blootgesteld.

## **21. How one can measure energy spectrum of electromagnetic or corpuscular radiation?**

Voor de duidelijkheid:

- Electromagnetic radiation = straling die bestaat uit fotonen



- Corpuscular radiaton = straling die bestaat uit subatomaire deeltjes zoals protonen, elektronen, deutronen, neutronen...

( Hoofdstuk 2, pagina 67 : *Particle/photon energy spectrum determination* )

Bij deze vraag moet er onderscheid worden gemaakt tussen lage en hogere energie voor elektromagnetische straling :

Zoals geweten, geldt voor een EM dat de energie wordt gegeven door  $E = hf$ , met  $h$ =cte van Planck en  $f$ = frequentie.

We meten meestal een golflengte  $\lambda$ , die we gemakkelijk kunnen omvormen naar energie of frequentie via  $c = \lambda f$ .

\*\*\* Lagere frequenties ( vb: zichtbaar licht )

Hiervoor zijn er meerdere meetmethoden mogelijk, die allemaal te maken hebben met interferentie en diffractie van lichtgolven.

Zo hebben we onder andere :

Proef van Young : Door van een bron het licht te laten invallen op een plaat met twee spleten, creëert men hier twee monochromatische bronnen die in fase zijn.

Via geometrische berekeningen die we allemaal hebben gedaan bij AN II, zien we de afstand tussen de minima en maxime op een achterliggende plaat verband houden met de golflente  $\lambda$  en dus ook met de frequentie  $f$  en de energie  $E$ .

Fraunhofer diffractie : Wanneer de afstand tussen de spleten ongeveer die van de golflengte van de straling benadert.

En zo zijn ook de van Fresnel en Michelson telkens een experiment dat gebaseerd is op deze basiseigenschappen van het golfkarakter van het licht.

\*\*\* Hogere frequenties ( X-stralen gebied )

Omdat bij hogere frequenties de golflengte tot de nm-schaal reduceert, zijn de bovenstaande proeven niet meer bruikbaar.

Hiervoor wordt bijgevolg gebruik gemaakt van de BRAGG-REFLECTIE BIJ KRISTALLEN. Van de kristallen is de afstand tussen de opeenvolgende atoomlagen bekend.

Bij het invallen van zulke X-stralen op het kristal, ontstaat er interferentie tussen golven die weerkaatst worden door bijvoorbeeld het eerste atoomvlak, en het tweede.

Via de formule  $n\lambda = 2d\sin(\theta)$ . kan de interferentie bepaald worden.

FIGUREN OP PAGINA 68 VAN HOOFDSTUK 3 BRENGEN VEEL DUIDELIJKHEID !

De afstand  $d$  tussen de atoomlagen is gekend, en de hoek  $\theta$  kan worden aangepast, zodat de interferentie ontstaat en de golflengte worden gemeten.

\*\*\* Nog hogere frequenties

( hiervan staan slechts enkele - zeer onduidelijke - regels op pagina 68 van hoofdstuk 3 )

Men kan de energie van fotonen bepalen met behulp van de dedectoren in VRAAG 20, die hier niet gebruikt worden om deeltjes te tellen, maar in de 'spectroscopy modus??'

De grootte van de verzamelde lading  $Q$  is gerelateerd aan de oorspronkelijke energie van het het foton of deeltje. Een ruwe schatting vind je door de lading  $Q$  te vermenig-

vuldigen met gemiddelde energie van een elektron-gat recombinitie of een electron-ion-paar creatie bij respectievelijk Vaste-stof en Gas detectoren.

Ook kan de scintillatie helderheid ( Zie toepassing van de PMT in VRAAG 20 ) en maat zijn voor de initiële energie van een deeltje.

*Hieronder vertaal ik gewoon wat er in de cursus staat, want ik word er niet wijzer uit... het spijt me :*

*Als een volgende stap worden het aantal van gebeurtenissen die dezelfde waarde voor de lading  $Q$  geven opged in individuele kanalen, met het Kanaalnummer dat groeit in*

*grootte met de gemeten lading. Door het plotten van het aantal metingen in elk kanaal in functie van het Kanaalnummer, bekomt men een replica van het gemeten deeltjes-*

*of foton energie spectrum.*

## 22. What is Zeeman effect and how it can be used to determine the magnetic moment of an electron or nucleus?

Het Zeeman effect heeft te maken met een energie-splitsing van deeltjes, wanneer ze in een magnetisch veld worden geplaatst.

Vele deeltjes hebben een intrinsiek magnetisch moment dat verschilt van 0. Volgens de kwantummechanica geldt dat de oriëntatie van deze magnetische momenten in een

aangelegd magnetisch veld enkel discrete waarden kan aannemen. Zo zijn er voor het elektron met Spin = 1/2 of Spin = -1/2 twee mogelijke manieren om zich op te lijnen met het Magn. veld

(volgens het veld, of tegengesteld aan het veld). ---figuur: zie pagina 16 in hoofdstuk 2 (onderaan) of pagina 55 in hoofdstuk 3---

Hierbij verschilt de energie van de 2 oriëntaties en wordt het energie-verschil gegeven door :

$$\Delta E = (h/2\pi)\gamma B$$
 waarbij  $\Delta E$  = energieververschil,  $\gamma$  = gyromagnetische verhouding,  $B$  = magnetisch veld en  $(h/2\pi)$  = gereduceerde constante van Planck.

Het exacte energie-verschil kan opgemeten worden door EM-golven in te sturen zodat  $\Delta E = h.f$ , ( het energieververschil = energie van het foton ).

Hierdoor kan men het deeltje van de lagere naar de hogere energie-toestand brengen, en deze verandering kan worden opgemeten\*.

*(\* Voor de liefhebbers, ik weet dit uit ons projectwerk, maar staat niet in de cursus: De overgang kan worden gemeten op de volgende manier :*

*Wanneer men golven instuurt op de kern of het elektron, zal bij de juiste energie dus absorptie optreden. De intensiteit van de ingezonden stralen is dus HOGER dan die*

*van de teruggekomen straling van het object, omdat een deel van de straling is geabsorbeerd. Dit intensiteitsverschil wordt dan opgemeten. )*

Als men bijgevolg de grootte van het Magnetische veld kent, kan via de bovenstaande vergelijkingen de gyromagnetische verhouding worden berekend voor een bepaalde kern of elektron.

Deze gyromagnetische verhouding is de verhouding van het Magnetisch dipoolmoment tot het angulaire moment van de kern of het elektron.

## **23. What say Wiener-Khinchine and Parseval theorems? What is the physical meaning of these statements?**

- **Wiener-Khinchine theorem**

Het Wiener-Khinchine theorema wordt gebruikt bij signaaltheorie. Als er immers een signaal door een door een systeem gestuurd wordt, zal het uitgangssignaal overeenkomen met het convolutieproduct van het ingangssignaal en de systeemrespons. Het Wiener-Khinchine theorema zegt nu dat de fouriergetransformeerde van het convolutieproduct van  $f$  en  $g$ , gelijk is aan het product van de fouriergetransformeerde van  $f$  en  $g$ . In formulevorm wordt dit:

$$f(t)*g(t) = F^*(\omega)G(\omega)$$

In signaaltheorie heeft dit tot gevolg dat in de uitdrukking voor het uitgangssignaal het convolutieproduct volledig weggewerkt kan worden door het uitgangssignaal in functie van frequentierepresentatie te schrijven. Dit gebeurt als volgt:

$$u(t) = i(t)*s(t) = F^{-1}[I(\omega) \cdot S(\omega)]$$

- **Theorema van Parseval**

Het theorema van Parseval zegt ons dat de integraal van een bepaalde functie over de frequentieruimte hetzelfde is als over de tijdsruimte:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(t)g(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} F^*(\omega)G(\omega)d\omega$$

Een belangrijke toepassing hiervan is het berekenen van de energie van een gegeven signaal. De energie is immers gedefinieerd als de integraal van min oneindig naar plus oneindig van het kwadraat van het signaal.

Dankzij de stelling van Parseval kan de energie dan op 2 manieren berekend worden, in de tijdruimte en in de frequentieruimte.

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega$$

Voor meer informatie ivm de effectieve uitwerking, zie signaaltheorie 4.3.

## **24. What says Nyquist sampling theorem? What means aliasing?**

Nuttige link: <https://redwood.berkeley.edu/bruno/npb261/aliasing.pdf> ■

Bij signaal sampling wordt een analoog signaal omgezet in een digitaal signaal. Om dit te doen, wordt de amplitude van het signaal op regelmatige tijdstippen gemeten.

Vervolgens kan mbv Fouriertransformaties overgegaan worden naar de frequenties. Hierbij is er voor elke frequentie dan een amplitude gevonden. Merk op dat de metingen van het signaal uitgevoerd moeten



worden met een zekere frequentie, genaamd de sampling frequentie, om zeker te zijn dat elk inkomend signaal geanalyseerd kan worden.

- **Nyquist sampling theorema**

Het Nyquist sampling theorema zegt dat als je een signaal aan het samplen bent, de sampling frequentie groter moet zijn dan 2 keer de bandbreedte (maximale frequentie) van hetingangssignaal moet zijn om het originele signaal perfect te kunnen reconstrueren van de gesampled versie, dus om van de digitale signaal het analoge signaal terug te krijgen.

- **Aliasing**

Als niet voldaan wordt aan het Nyquist sampling theorema, zullen de hogere frequenties een bijdrage leveren aan de lagere frequenties. Dit is "aliasing". Als nu het oorspronkelijke signaal gereconstrueerd wordt, zal het resultaat wel aan het Nyquist sampling theorema voldoen maar niet meer het oorspronkelijke signaal zijn. De hogere frequenties zijn immers weggevallen en de lagere frequenties hebben een bijdrage gekregen van de hogere.

Dit kan opgelost worden door eerst het signaal door een Low Pass filter te sturen zodat de hogere frequenties wegvallen. Op deze manier blijven de

lagere frequenties behouden. Tevens kan het verlies van de hogere frequenties niet altijd kwaad. Bij foto's vallen de hogere frequentie buiten het zichtbare licht en maakt het helemaal geen verschil als ze wegvallen voor de foto.

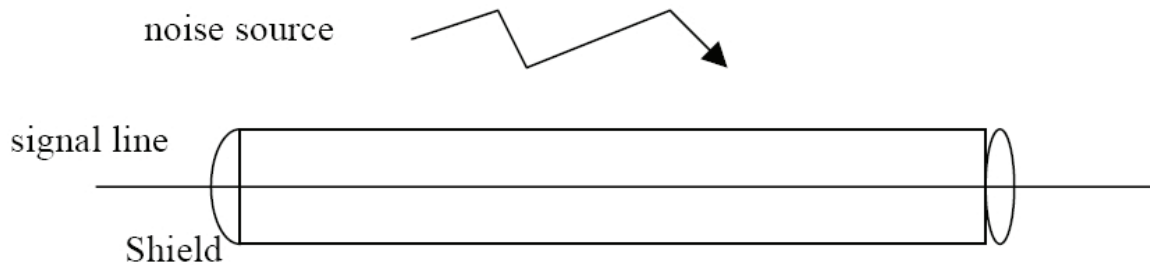
## Vraag 25-28 (zie vorig jaar vraag 23-26)

### **29. Describe physical origin and most important properties of noise originating from radiative and inductive coupling**

- Radiative coupling (voor meer info: puntje 6.5)

Wisselstroom veroorzaakt elektromagnetische straling (vergelijk wisselstroom met een dipoolantenne ...). Aangezien wij een grote fan zijn van wisselstroom op 50 Hz, gaan wij hierdoor een zekere straling ondervinden met frequenties op veelvoud van 50 Hz. De grootste piek is de zogenaamde "Hum" op 50 Hz, maar er zijn ook grote pieken op 100 en 150 Hz. Als we groot genoeg frequenties gebruiken, zal het effect verwaarloosbaar worden. De draden die onze signalen vervoeren gaan deze elektromagnetische straling "oppikken" en zo een storing ondervinden op 50 Hz en veelvoud. Er kunnen ook andere bronnen zijn van deze straling (die dan ook op andere frequenties kunnen voorkomen), maar ons elektriciteitsnet levert de grootste bijdrage.

De beste manier om het effect van deze ruis te verminderen, is door op hoge frequenties ( $> 100$  Hz) te werken en veelvoud van 50 Hz te vermijden. Als er toch met kleine frequenties wordt gewerkt, kan men deze best afschermen door coaxiale kabels te gebruiken of door de draad af te schermen met een geaard omhulsel:



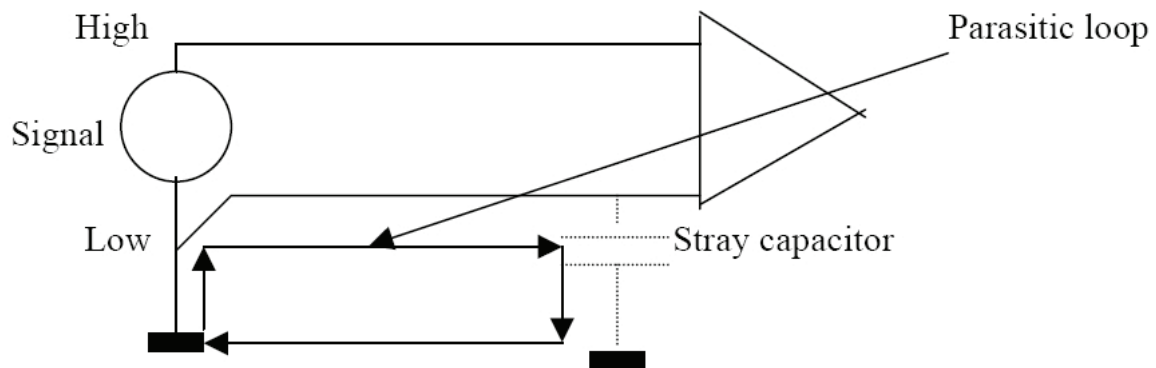
De combinatie van dit omhulsel en de draad gaat een condensator vormen. Met een effectieve capaciteit gaat een combinatie zijn van de capaciteit tussen de bron en het schild en tussen de draad en het schild. Wanneer we echter het schild met een lage weerstand aan de grond vasthangen, kunnen we de ruis verminderen met een factor

$$\frac{R_{ground}}{\left( \frac{1}{\omega \cdot C_{signal-shield}} \right)}$$

Gewoonlijk gaat deze factor van een grootte van  $10^7$  zijn. Algemeen moet de draad zo kort mogelijk worden gehouden om de  $C_{signal-shield}$  zo klein mogelijk te houden.

- Inductive coupling (voor meer info: puntje 6.6)

Deze ruis lijkt op het vorige geval, maar heeft een magnetische oorsprong. Als er een gesloten kring voorkomt vlakbij de experimentele opstelling (zie figuur) kan deze voor een magnetische koppeling zorgen en zo onze metingen in de war brengen. Het beste is om er (net zoals bij radiative coupling) een geaard schild rond te zetten om zo het magnetische veld tegen te gaan.

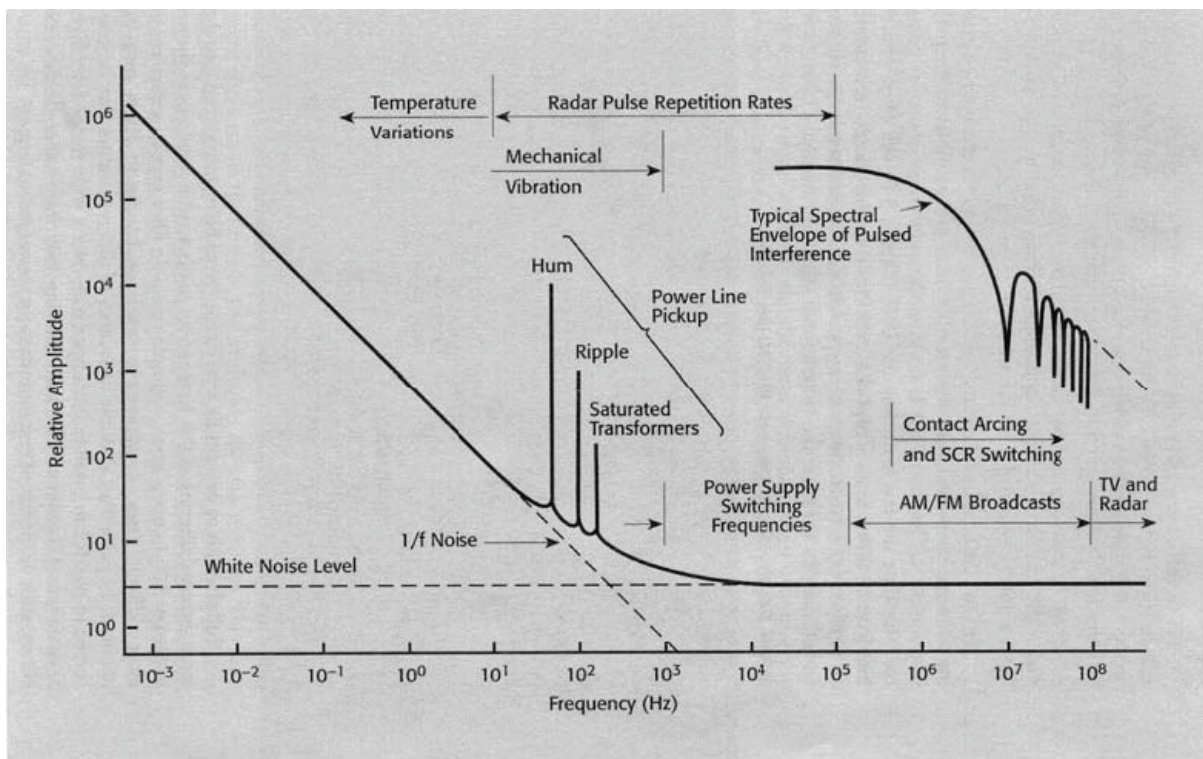


### **30. Describe physical origin and most important properties of $1/f$ (flicker) noise.**

Deze vorm van ruis komt voor in veel, zo niet alle, vaste stof elektronica componenten. De  $1/f$ -ruis is gelinkt aan de "random telegraph signals", die voornamelijk wordt opgewekt door oppervlak- of interface effecten. De  $1/f$ -ruis heeft niet 1 oorsprong, maar is eerder de som van vele fysische verschijnselen. Zo kan deze afhankelijk zijn van de thermische ruis, of van interacties tussen elektrische ladingen. Als er een uniforme verdeling is van signalen (die als  $1/f^2$  dalen) met centra waar de ruis

groot is, kan hierover een integraal worden genomen en volgt hieruit een  $1/f$ -afhankelijkheid.

De  $1/f$ -ruis is, in tegenstelling tot sommige andere ruisfactoren, afhankelijk van materiaal tot materiaal en hier kan dus geen algemene voorspelling worden gemaakt over de  $1/f$ -ruis. Over het algemeen moeten lage frequenties vermeden worden.



### 31. What is the difference between *accuracy* and *precision* of a measurement instrument?

- Accuracy (nauwkeurigheid)

De accuracy is afhankelijk van het gebruikte instrument. Deze heeft dus te maken met de systematische fout van het instrument. Hoe kleiner de systematische fout, hoe nauwkeuriger het resultaat.

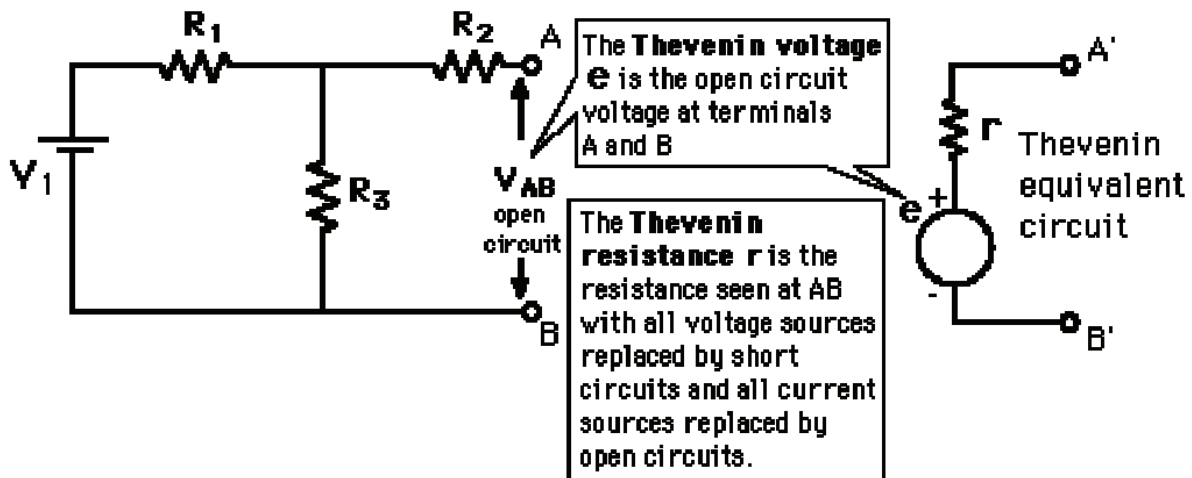
- Precision (precisie)

Precisie is gelinkt met ruis, en dus met de willekeurige fout. Er zijn natuurlijk ook altijd kleine afwijkingen op het materiaal dat we gebruiken. Bijvoorbeeld: een weerstand die gemaakt werd om 10 ohm te zijn, zal altijd een kleine afwijking van deze waarde hebben. Dit is dus ook gelinkt met de precisie. Hoe kleiner de willekeurige fout, hoe preciezer de meting.

### **32. Describe two approaches to analysis of signal source loading (Thevenin and Norton theorems)**

- Thevenin

Thevenins theorem zegt ons dat elk netwerk bestaande uit lineaire impedanties en voltagebronnen vervangen kan worden door een equivalent circuit met voltagebron  $e$  met in serie een impedantie  $r$ . Het voltage  $e$  is dan gelijk aan de output voltage van het netwerk en  $r$  is gelijk aan de totale impedantie van het circuit, waarbij we het zien als output uitgangen met alle voltagebronnen 0 en vervangen door hun interne impedanties.



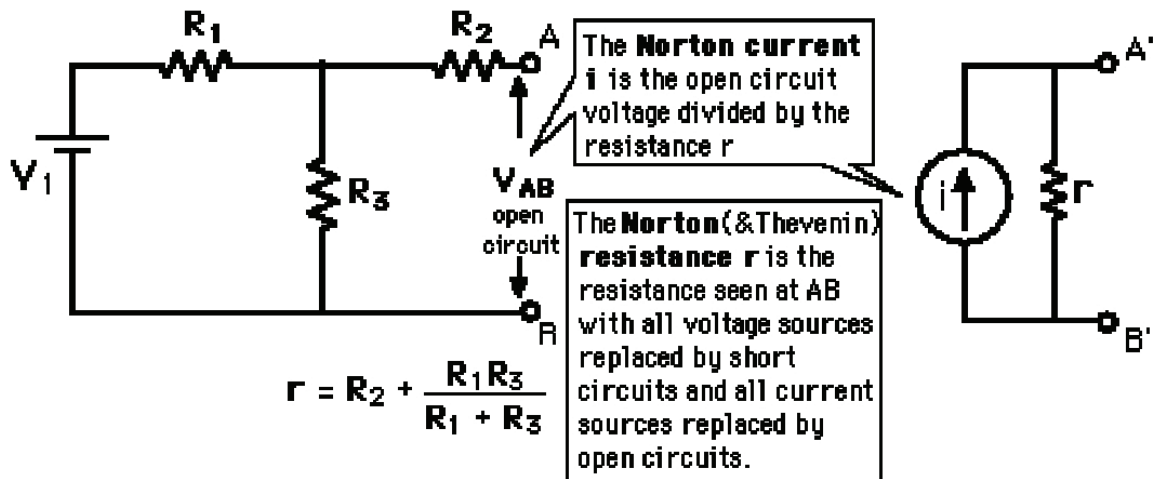
Als we dan een meetinstrument met weerstand  $R$  eraan hangen wordt de uitgaande stroom en spanning bepaald door:

$$i = \frac{e}{R + r}$$

$$V = i \cdot R = e \frac{R}{R + r}$$

· Norton

Nortons theoreem zegt eigenlijk hetzelfde maar dan voor een stroombron die parallel komt te staan met de weerstand. We gebruiken weer lineaire impedanties en voltagebronnen.  $r$  blijft hetzelfde voor Norton als voor Thevenin.



Het uitgaande voltage wordt dan gelijk aan:

$$V = i \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)^{-1} = i \frac{r \cdot R}{r + R}$$

### 33. What is the physical meaning of the noise figure and what device parameters can be found from it?

noise figure  $f$  = karakterisatie vd extra ruis die een versterker toevoegt

idee: factor waarmee S/N verslechtert (daalt) nadat signaal door

versterker ging

Oorspronkelijk: signaal  $S$  ruis  $N$

Na versterken:  $k \cdot (S + N) + N_a$  (=additionele ruis)

Beschouw  $R_a$  alsof het een extra ruis was op ingang:  $R_e$

dus: uitgang =  $k \cdot (S + N + N_e)$

uitwerken zoals vgl'n 7.3 en 7.4

Ruis in ingang is \*minstens\* thermische ruis: ondergrens bepalen voor  $f$

leidt tot factor in 7.6:



$$f(f) = \sqrt{1 + \left( \frac{D_e(f)}{4K_B T R} \right)}$$

f is dus meer specifiek: verslechtering van S/N indien: ingang = thermische ruis in weerstand

Ook gebruikt: F = f in dB:

$$F = 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{D_e(f)}{4k_B T R} \right)$$

Enkele waarden:

F < 1dB == zeer goed

F > 10dB == zeer slecht

F is te herwerken naar equivalente ingangruis =  $N_e \sim \text{sqrt}(D_e)$

$$N_e = \sqrt{4k_B T R (10^{F/10} - 1)}$$

dit is \*per Hz bandbreedte!\* (noot: die eenheden zijn nogal fishy ... (then again, gans die cursus is fishy :X))

### **34. What are the properties of optimum and matched filters?**

Filter: bekijk enkel de relevante frequenties: geen last vd ruis elders

spectra:

transfer functie: Y

input = I = S + N

doel: output = YI = S

## Optimum

= output naar een (vooraf gekende) "correcte" vorm transformeren

minimaliseer kwadratische afwijking tss signaal S en output YI

vgl 7.10; maar volgt ook gewoonweg uit doel:

$$YI = S \Rightarrow Y = S/I$$

$$\Rightarrow \mathbf{Y = S/(S+N)}$$

maw:

Y groot ( $\sim 1$ ) voor frequenties van S

Y klein ( $\sim 0$ ) voor alle rest

$\Rightarrow$  zorg dat Y "aansluit" bij S

Opm: S en N niet echt gekend; maar uit  $S/(S+N)$  kan wel ongeveer de correcte freqband gevonden worden

## Matched

= S/N minimaliseren

in praktijk: Y gelijkaardig aan optimum filter

S = max signaal amplitude

N = rms vd ruis; want gemiddelde = belangrijker dan expliciet maximum

(korte pieken maken niet veel uit)

uitwerking (p6; maar onbegrijpelijk  $>_<$ ) levert uiteindelijk

$$Y(\omega) = S^*(\omega)e^{-i\omega t_m}$$

met  $t_m$  = measurement time

=> spectrum dus ook laten aanleunen bij het signaal S, maar met wat extra fasefactoren

Uit de maximale S/N voor deze Y volgt:

$$(S/N)_{\max}^2 = \frac{\int SS^* d\omega}{\langle D_n \rangle}$$

waarbij integraal over de opgemeten bandbreedte, en  $D_n$  de spectrale dichtheid vd ruis op deze bandbreedte

Dus:

- meet grote signalen (zodat integraal over  $SS^*$  groot is)
- meet op frequentiebanden waar weinig ruis is (zodat  $\langle D_n \rangle$  klein is) => hoge frequenties, buiten de 1/f noise, hum, ...

### **35. Describe the noise suppression using signal averaging.**

meten aan hoge frequenties niet altijd mogelijk (vb: traag verval van deeltjes => behoorlijke tijd tussen)

oplossing: integratie of uitmiddeling vh signaal

ingangssignaal =  $s + n$  (signaal + noise)

sample dit N keer: s blijft +/- gelijk; maar n is willekeurig

=> output =  $s \cdot N + n \cdot \sqrt{N}$

(noise maak een 'random walk', vandaar de vierkantswortel)

de gemeten s/n is nu  $\sqrt{N}$  keer hoger dan diegene zonder accumuleren

(dus bij 1 meting, 'N=1')

NOOT: oppassen voor aliasing bij het sampelen van signaal: zorg voor een laag-doorlaat filter bij correcte cut off om geen hoogfrequente ruiscomponenten mee te hebben!

## vraag 36-38 (zie vorig jaar vraag 33-35)

**39. Describe the application of bridge circuits in electrical measurements and the optimal construction of the resistive differential bridge.**

Om extra ruisvermogen te vermijden, moeten we een zo zuiver mogelijk inputsignaal van de detector verkrijgen als mogelijk.

Er wordt gebruik gemaakt van een brug-circuit. Eén van de armen bevat de fysische detector. (zie figuur 7.11 pg 15)

Een signaal zal zorgen voor een afwijking; het outputsignaal wordt gemeten t.o.v. 0 volt of de achtergrond waarde.

Optimale structuur: Wheatstone brug

Als de brug in balans is, zal de afwezigheid van een signaal overeenkomen met een spanningsverschil van nul volt over

de centrale detector.

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{R_A}{R_B}; R_x = \frac{R_s R_A}{R_B}$$

Om deze balans te bereiken kunnen we de waarde van de variabele weerstand  $R_s$  aanpassen.

We willen nu de relatieve gevoeligheid maximaliseren. Deze is

gedefinieerd als  $v = \frac{s}{V}$

met  $s$  de signaalsterkte en  $V$  de spanning afkomstig van de voeding van de brug.

De ratio van de weerstanden  $r$  is gelijk aan:  $r = \frac{R_x^{min}}{R_s}$

De fracionele waarde van de sensor weerstand (duid het bereik aan waarover deze varieert) :  $x = \frac{R_x}{R_x^{min}}$

We nemen aan dat de brug gebalanceerd is bij aanwezigheid van een signaal wanneer  $R_x = R_x^{min}$ .

Dan verkrijgen we:  $r = \frac{R_x^{min}}{R_s} = \frac{R_A}{R_B}$

Bekijken we het spanningsverschil tussen de twee spanningsverdelers ( $R_x, R_s$  en  $R_a, R_b$ ), dan bekommen we voor de uitgangsspanning:

$$s = V \left( \frac{R_B}{R_B + R_A} - \frac{R_s}{R_s + R_x} \right)$$

Hieruit leiden we dan af voor  $v$  :  $v = \frac{1}{1+r} - \frac{1}{1+rx}$

De gevoeligheid van het brugcircuit bereikt zijn maximum bij  $rx = 1$ .

Aangezien een waarde van  $x$  ongeveer 1 overeenkomt

met een zwak signaal (kleine afwijking van de waarde zonder signaal), zal

$r$  idealiter ook ongeveer 1 zijn.

$$\frac{dv}{dx} = \frac{r}{(1+rx)^2}$$

Dus voor de optimale brug geldt:  $R_A = R_B$  en  $R_S = R_X$

#### **40. How does a Digital to Analog Convertor (DAC) work? (R-2R**

ladder or with identical current sources)

*R-2R ladder DAC* (zie figuur 8.1 pg 2)

Het doel van dit circuit is een analoog signaal transformeren naar een

digitaal signaal. (van 10-tallig naar binair dus eigenlijk)

Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een recursief circuit (de vierkanten in de figuur). Het initiële element is een parallelschakeling van twee weerstanden met een waarde van  $2R$ . Of met andere woorden, een equivalente weerstand van  $R$ . Dit element wordt in het volgende element seriël geschakeld met een weerstand  $R$ , en deze tesamen parallel met  $2R$ . Zo krijgen we voor dit element weer een equivalente weerstand van  $R$ . Dit gaat zo door voor verschillende elementen.

De stroom die het circuit binnengaat is dus gelijk aan  $I = \frac{V_{ref}}{R}$ .

Als we de stroom doorheen het circuit volgen komen we verschillende knooppunten tegen, een binnen elk circuitelement. Aangezien de weerstand in beide takken gelijk is, krijgen we een evenredige opsplitsing:

$I/2$  zal afgesplitst worden en naar een schakelaar gaan;  $I/2$  zal naar het volgende circuit element gaan. Daar wordt het weer opgesplitst en krijgen we een stroom  $I/4$  die naar een tweede schakelaar gaat en  $I/4$  die naar het volgende element gaat, enz...

Als we de setting van de verschillende schakelaars als het digitaal input signaal bekijken (met 0 voor een open en 1 voor een gesloten), dan zal de som van de uitgaande stromen overeenkomen met het equivalente analoge signaal.

We noemen de eerste schakelaar de Most Significant Bit (MSB) en de laatste de Least Significant Bit (LSB).

Als we voor de setting van de LSB de variabele  $S_1$  nemen, dan bekommen we de volgende uitdrukking voor de totale stroom.

$$I_{total} = \frac{V_{ref}}{2R} (S_N \times 1 + S_{N-1} \times \frac{1}{2} + \dots + S_1 \times \frac{1}{2^{N-1}})$$

Waarbij  $S_i$  gelijk is aan 0 of 1, afhankelijk van de setting van de schakelaar.

We kunnen deze uitdrukking vereenvoudigen:

$$I_{total} = \frac{V_{ref}}{2^N R} (S_N \times 2^{N-1} + S_{N-1} \times 2^{N-2} + \dots + S_1)$$

Maar de term tussen haakjes komt perfect overeen met een binair getal met  $N$  bits:

$$(b_N b_{N-1} \dots b_2 b_1)$$

De waarde van de  $N$  bits is bepaald door de setting  $S_1$ - $S_N$  van de schakelaars.

Voorbeeld: 5 schakelaars: 10010



De uitgaande stroom is dan (in functie van de binnenkomende)

$$I_{result} = I \times \frac{1}{2^5} (1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0) = I \times \frac{1}{32} (18) = \frac{18}{32} I$$

En dit komt perfect overeen met het ingevoerde digitaal signaal 10010, wat immers gelijk is aan 18.

#### **41. How does a successive approximation AD convertor work?**

(zie ook figuur 8.3 en 8.4 op pg 5 & 6)

Een AD convertor zet een analoge ingangssignaal om in een digitaal uitgangssignaal.

Er wordt feitelijk gebruik gemaakt van een omweg. Men itereren over alle mogelijke digitale signalen, deze door een AD convertor sturen en het analoge uitgangssignaal vergelijken met het werkelijke analoge ingangssignaal.

Dit wordt op de volgende manier gedaan: een shiftregister houdt het huidige digitaal signaal bij. Bij het van start gaan wordt dit op 00...00 gezet.

Dan begint het iteratieproces. De meest linkse bit (de Most Significant Bit) wordt op een gezet. Het verkregen uitgangssignaal van de DA convertor wordt vergeleken met het analoge ingangssignaal. Is het uitgangssignaal van de DA kleiner of gelijk aan het analoge signaal gebeurt er niets. Is het groter, wordt de huidige bit op 0 gezet en schuift het proces één bit naar rechts op en wordt herhaald totdat we aan de meest rechtse bit zitten.

Voorbeeldje (normaal worden de spanningen vergeleken):

Stel dat het analoge signaal een waarde "7" heeft. En dat het digitaal signaal 4 bits kan bevatten.

Dan gaat het proces als volgt.

1000 komt overeen met een waarde van 8. Dit is groter dan 7 dus wordt de eerste bit op 0 gezet.

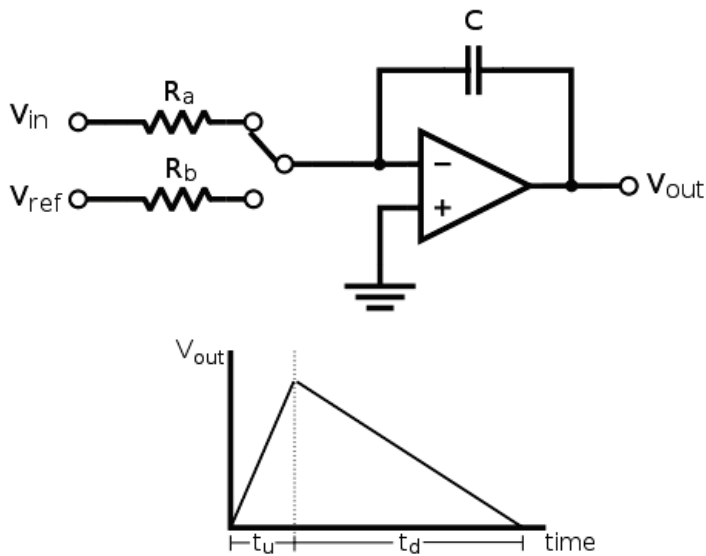
0100 komt overeen met een waarde van 4. Dit is kleiner dan 7 dus wordt de tweede bit op 1 gehouden.

0110 komt overeen met een waarde van 6. Dit is kleiner dan 7 dus wordt de derde bit op 1 gehouden.

0111 komt overeen met een waarde van 7. Dit is gelijk aan 7, dus wordt de vierde bit op 1 gehouden.

We hebben het einde bereikt. Ons finaal digitaal signaal is dus 0111 en dit is inderdaad gelijk aan 7.

## 42. How works a dual slope AD converter?



De "dual-slope" staat voor het grafiekje onder. Eigenlijk komt deze methode erop neer een condensator via een opamp (het geheel is een integratorschakeling, zie practicum opamp) op te laden voor een bepaalde tijd. Daartoe wordt de spanning  $V_{in}$  (het analoge signaal) op de integratorschakeling aangeschakeld voor een gekende tijd  $T_1$  (in een computer:  $N$  klokcycli, bij een quartzkristal:  $N$  trillingen), en daarna wordt een gekende spanning met tegengestelde polariteit ook op de integrator aangeschakeld, en de tijd  $T_2$  (aantal klokcycli/trillingen  $n$ ) wordt gemeten waarin de condensator terug naar 0 gaat (deïntegreren). Blijkbaar geldt deze formule:

$$T1 \cdot V_{in}/RC = T2 \cdot V_{ref}/RC$$

Die omgezet kan worden naar deze ( $T=x$  klokcyclus/trillingen):

$$V_{in} = V_{ref} \cdot n/N$$

In deze is enkel  $V_{in}$  onbekend, en kan dus simpelweg berekend worden.

De precisie hangt enkel af van de precisie op  $V_{ref}$  en de interne klok.

Voordeel van dit systeem: grote precisie ("accuracy"), onafhankelijk van temperatuur/stabiliteit van  $R, C$ ..( deze worden heen en terug geïntegreerd)

Nadeel: deïntegratie (ontladen) kost relatief veel tijd

## 43. How does a flash AD converter work?

Een flash AD is gemaakt om zeer snel  $A \rightarrow D$  om te zetten. Dit gebeurt door de spanning van alle mogelijke waarden die het uiteindelijke digitale getal kan hebben, tegelijk te vergelijken met de ingegeven spanning  $V_{in}$  (merk op dat dit bij een gewone R-2R na elkaar gebeurt). Dit is het best uit te leggen met een voorbeeld: stel dat het digitale getal dat de flash AD moet teruggeven 8 bits bevat, dan kan dit getal de waarden 0-255 aannemen. De flash AD moet dan voor al die 255 waarden tegelijk een

overeenkomstige spanning creëren en vergelijken. Dit creëren gebeurt met o.a. 255 R-2R ladders (worden ingesteld op 1-255, en geven dus respectievelijk  $1-255 \cdot V_{ref}/256$ , zie R-2R), en een circuit dat controleert of  $V_{in}$  kleiner is dan  $V_{(R-2R)}$  (geeft een 0 indien wel, een 1 indien niet). De R-2R ladder + dat controlecircuit noemt men de comparator. ER zijn dus minstens 255 comparators (de nulde comparator is niet nodig, die geeft toch altijd 0). Vanuit die comparators vertrekt dus een lijst 111...1000...0 (de comparators staan van groot naar klein), dat aankomt in de zogenaamde thermometer. Die thermometer vist uit welk getal overeenkomt met de grens tussen de 1tjes en de 0tjes, wat het digitale getal bepaalt van dit analoge signaal. Het nadeel van dit systeem is duidelijk het feit dat er 255 comparators nodig zijn (255 keer meer dan een simpele R-2R ladder), en ook snel genoeg logische eenheden (bvb in de thermometer). Ook is het maximum aantal bits beperkt (teveel comparators verwekken teveel hitte/kunnen niet meer samen in de flash AD zitten). Een mogelijke oplossing voor dit systeem is om de flash AD's zelf ook weer de mogelijke getallen te laten overlopen in plaats van ze allemaal tegelijk te berekenen. Op die manier kan met minder comparators toch een hogere precisie bereikt worden, echter wel ten koste van de snelheid.

**vraag 44 -47 (zie vorig jaar vraag 41-44)**

## 48. What changes occur in thermal properties of materials at low temperatures?

Mechanische eigenschappen:

Niet alle materialen zijn geschikt om te gebruiken bij cryogenics, sommige materialen worden breekbaar, andere worden dan weer harder. Men moet ook rekening houden met de thermische contractie van bepaalde materialen. Materialen die wel bruikbaar zijn zijn stainless steel, aluminium, koper, Niobium en titanium enz...

Temperatuur afhankelijkheid van warmte capaciteit van vaste stoffen:

De warmte capaciteit van materialen is de meest belangrijke parameter die bepaalt hoeveel warmte van een machine moet gehaald worden om de gewenste temperatuurschaal te bereiken. In vaste stoffen kan de warmte bewaard worden in twee systemen:

- Lattice vibrations (ik denk vibraties door de structuur van het materiaal)
- Electronen als hun concentratie groot is.

Lattice contribution:

Het klassieke model is gebaseerd op de veronderstelling dat elk atoom een 3D oscillator is die  $U=3k_B T$  heeft. De energie die in 1 mol van een stof zit is dan gelijk aan :  $U=N_A k_B T=3RT$ .

De warmte capaciteit is dan gelijk aan  $3R$ , dit is de Dulong-Petit wet. Dit klassiek model is goed bij kamertemperatuur, maar bij lage temperaturen geldt deze niet meer omdat er dan meer quantum effecten zijn. Er zijn twee theorieën om de quantum mechanica te gebruiken om de warmte capaciteit te bepalen.

De Einstein theorie: Er wordt een vereenvoudiging gemaakt, namelijk dat alle atomen in een vaste stof vibreren met een zelfde frequentie bij

gekwantiseerde amplitudes. De gekwantiseerde energie van elke oscilator is

$$\text{dan } U = \left(n + \frac{1}{2}\right)h\nu$$

En de warmte capaciteit is dan als volgt:  $C_{lattice} \sim T^{-2}e^{\frac{\Theta_D}{T}}$

waarbij  $\Theta_D = h\nu/k_b$

de Debye temperatuur is (een temperatuur afhankelijke soortelijke warmte met de karakteristieke temperatuur van een atomische vibratie). Dit kwam echter niet overeen met experimentele waarden.

De Debye theorie: Deze theorie zegt dat dat atomen in een vaste stof niet onafhankelijk zijn en alleen bepaalde vibratie frequenties zijn mogelijk. De

soortelijke warmte is dan:  $C_{lattice} = 9R \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} dx \frac{e^{x^4}}{(e^x - 1)^2}$

- Bij kamertemperatuur geldt dan dat  $C \sim 3R$  (Dulong-Petit wet) en als

$T < 0,1\Theta_D$   $C$  varieert de soortelijke warmte capaciteit met  $T^3$ . Lage  $C$  betekent dat grote temperatuurs veranderingen als kleine warmtebronnen aanwezig zijn.

Elektronen contributie aan soortelijke warmte van metalen:

Thermische energie kan ook opgeslagen zijn in de vrije elektronen van een metaal. Volgens quantum theorie kunnen alleen elektronen met een smalle fractie dicht bij de Fermi energie naar een hogere staat gebracht worden en zo thermische energie opslaan. De soortelijke warmte hierdoor veroorzaakt

is gelijk aan:  $C_{elektron} = BT$

(evenredig met de temperatuur dus.) De totale specifieke warmte capaciteit is dan gelijk aan:  $C = C_{elektron} + C_{lattice} = AT^3 + BT$

Onder de 4K wordt de elektron contributie aan de specifieke warmte belangrijk. In cryostatica daalt C raper met dalende temperatuur, hierdoor zullen cryogene systemen sneller afkoelen als ze kouder worden en zullen smalle warmte lekken grote temperatuurstijgingen veroorzaken.

Temperatuur afhankelijkheid van thermische expansie:

Wanneer materialen worden afgekoeld van 300K tot cryogene temperaturen zal de thermische expansie coëfficiënt veranderen. Hierdoor kan het materiaal onverwachts inkrimpen. De expansie coëfficiënt ( $\alpha$ ) zal naar 0 gaan als de T dicht bij 0K komt en  $\alpha$  is bijna temperatuursonafhankelijk bij hoge temperaturen. Meeste mechanische deformatie (90%) gebeurt wanneer het materiaal van kamertemperatuur naar vloeibaar stikstof wordt gebracht.

Temperatuur afhankelijkheid van de thermische geleiding:

De warmte flux door een stuk geleider is gelijk aan :  $Q = -\kappa(T)A(x)\frac{dT}{dx}$

waarbij  $\kappa$  de thermische conductie coëfficiënt is. Belangrijk is dat  $\kappa(T)$  significant varieert met de temperatuur. Weer twee mechanismen die energie kunnen transporteren:

- Lattice vibrations
- Geleider elektronen.

In "pure" metalen domineert de contributie van geleider elektronen.



Elektron component: De thermische geleidbaarheid  $\kappa_e$  is invers evenredig met de thermische weerstand  $W_e$  die elektronen ondergaan door hun verspreiding. Er zijn twee verspreiding mechanismen, verspreiding door onzuiverheden ( $W_o = \beta/T$ ) en verspreiding door fotonen ( $W_i = \alpha T^2$ ). De elektronen component van de warmte weerstand wordt dan:

$$W_e = \alpha T^2 + \frac{\beta}{T}$$

(bij lage temperaturen is onzuiverheden scattering dominant).

Warmte geleiding door rooster trillingen: De grootste weerstand tegen dit type warmte geleiding in metalen komt door de verspreiding van fononen (gekwantiseerde trillingswijze van een kristal) op de geleiding elektronen.  $W_{ph} = A/T^2$ . Dit effect wordt genegeerd in metalen, maar is het enigste effect bij halfgeleiders en isolatoren.

Metalen hebben grote verschillen in thermische geleidbaarheid.

**49.** What changes occur in electrical properties of materials at low temperatures? How are they related to the thermal properties (the Wiedemann-Franz law)?

o

Temperatuursafhankelijkheid van elektrische resistiviteit:

In de wet van Ohm is de elektrische weerstand gerelateerd aan de specifieke resistiviteit  $\rho$ . In metalen is verandering van elektrische resistiviteit vooral veroorzaakt door het verspreiden van elektronen door rooster trillingen (fononen) en door het verspreiden van elektronen door onzuiverheden of defecten. Voor

Temperaturen  $T > \Theta_D$  zal de fononen verspreiding overheersen en  $\rho$  stijgt

evenredig met  $T$ :  $\rho(T_2) = \rho(T_1) + \alpha(T_2 - T_1)$

met  $\alpha$  de lineaire thermische coëfficiënt van elektrische weerstand. Bij lage temperaturen  $T \ll \Theta_D$  zal de onzuiverheden verspreiding overheersen en zal  $\rho$  constant worden. Tussen deze twee gebieden zal  $\rho$  een functie worden van de temperatuur. De Residual Resistance Ratio (RRR) wordt gebruikt voor de onzuiverheid van een metaal.

Wiedemann-Franz wet: In metalen worden de thermische ( $\kappa$ ) en de elektrische ( $\sigma$ ) geleidbaarheid bepaald door dezelfde elektron verspreiding mechanismen: de elektron-fonon en elektron-onzuiverheid interacties. De Wiedemann-Franz wet zegt

$$\kappa/\sigma = L_0 T$$

Waarbij  $L_0$  de Lorentz constante is:  $2,48 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ . Deze wet geldt bij kamertemperatuur en  $T \ll \Theta_D$ .

## 50. Describe thermodynamic cycles used for cooling in cryogenic temperature range.

Isoentropische koeling:

Om af te koelen moet de entropie  $S$  dalen. Om de temperatuur in praktijk te laten dalen moet men dus eerst een manier vinden om de entropie te verlagen bij constante temperaturen. Dit laatste lijkt onmogelijk omdat de entropie niet alleen afhangt van  $T$  maar ook van andere fysische eigenschappen. Zie tekening 10.6. In tak AB wordt de parameter  $X$  verlaagd en zo wordt de entropie verlaagd terwijl de temperatuur dezelfde blijft. Daarna wordt de temperatuur adiabatisch verlaagd. Daarna door  $X$  terug naar zijn oorspronkelijke waarde te laten gaan zal het systeem een lagere

temperatuur hebben, dit wordt vele keren uitgevoerd, zo zal de temperatuur zakken.

(Merk op het is onmogelijk om tot 0K te komen)

Adiabatische expansie cyclus:

Hier is  $X$  de druk. Dit wordt gebruikt in de Simon helium liquefier. (zie figuur 10,7)

Hier wordt He gas gecomprimeerd in 1 kamer tot ongeveer 100atm terwijl de temperatuur 15K blijft door He in kamer 2 hitte te laten uitwisseln met het kokende H<sub>2</sub> in het buitenste vat. Daarna wordt het He in kamer 2 verwijderd en zal de gecomprimeerde He van kamer 1 uitzetten tot een druk van 1 atm. Hierdoor zal het gas in kamer 1 afkoelen tot een temperatuur  $T_c$ .

Adiabatisch demagnetisatie cyclus:

Hier is  $X = B$  (magnetisch veld). Dit is de meest gekozen techniek om temperaturen lager dan 1K te krijgen. Tak AB: in een paramagnetisch zout worden de zwakke interagerende spins opgelijnd door een hoog magneet veld aan te leggen hierbij wordt de warmte van de magnetisatie door het He contact overgedragen aan het He in de omgevende kamer. Nadat het overdrachtsgas is verwijderd, wordt het magneet veld gereduceerd en de temperatuur van de zout pil daalt door adiabatische demagnetizatie. (de spins keren terug naar een chaotische ordening, de totale entropie blijft hetzelfde dus de temperatuur daalt.).

