

Good Engineering Practice

Do's and don'ts in de elektrotechniek.

β release

Ing. C.H.A. Keyer,
Hogeschool van Amsterdam
Department of Electronic Engineering

10 april 2007

Copyleft: ©Cees Keyer, Hogeschool van Amsterdam.

Alles uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur.

Voor dit document geldt de zogenaamde GPL General Public License, alles kan en mag worden overgenomen mits de bron wordt vermeld.

Copyleft: ©Every thing from this document may be reproduced without any permission from the author. If you do copy use a citation.

Caution:Reading document may cause drowsiness. Do not read before driving or operating machinery.

Lees Mij

In dit epistel wordt aandacht besteed aan veel praktische zaken rond het ontwerpen van elektronica.

Cees Keyer
E-mail: pe1jmj@amsat.org

Andijk-Amsterdam maart/april 2005

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding Good Engineering Practice | 7 |
| 1.1 | Wat gaan we doen. | 7 |
| 1.1.1 | Globale inhoud van het vak | 7 |
| 2 | Componenten | 9 |
| 2.1 | Welke zijn er allemaal. | 9 |
| 2.2 | De weerstand | 10 |
| 2.2.1 | Weerstand | 10 |
| 2.2.2 | Dissipatie in weerstanden | 11 |
| 2.2.3 | Soorten weerstanden | 12 |
| 2.3 | Skineffect | 13 |
| 2.4 | De condensator. | 14 |
| 2.4.1 | De natuurkundige beschrijving van de condensator | 14 |
| 2.4.2 | De Effectieve Serie Weerstand [ESR]. | 17 |
| 2.5 | De spoel. | 18 |
| 2.6 | De common mode choke | 20 |
| 2.7 | Opdrachten: | 21 |
| 3 | Foutberekening en opgave van meetgegevens. | 23 |
| 3.1 | Inleiding. | 23 |
| 3.2 | Fouten systematisch of toevallig. | 24 |
| 3.3 | Spreiding en toevallige fouten. | 25 |
| 3.4 | Foutvoortplanting | 27 |
| 3.5 | Opgave van het eindresultaat. | 31 |
| 4 | Behuizingen | 33 |
| 4.1 | Inleiding. | 33 |
| 4.2 | Component behuizingen. | 33 |

| | | |
|------------------|--|-----------|
| 4.2.1 | introductie. | 33 |
| 4.2.2 | Terugblik. | 34 |
| 4.3 | Productie technieken | 35 |
| 4.3.1 | Buizen en de hooibergmethode | 35 |
| 4.3.2 | Trough hole | 36 |
| 4.3.3 | smd techniek | 36 |
| 4.4 | lood vrij solderen | 37 |
| 4.5 | Oprachten. | 38 |
| 5 | Koelen en gekoeld worden. | 41 |
| 5.1 | Inleiding. | 41 |
| 5.2 | Warmteleer. | 42 |
| 5.2.1 | Geleiding. | 42 |
| 5.2.2 | Convectie | 45 |
| 5.2.3 | Warmte straling | 45 |
| 5.2.4 | Voorbeeld. | 46 |
| 5.3 | Thermische weerstand. | 49 |
| 5.4 | Praktische koeling | 49 |
| 5.4.1 | Een voorbeeld. | 51 |
| 6 | Inleiding EMC | 53 |
| 6.1 | Elektromagnetische velden een inleiding. | 53 |
| 6.2 | Elektromagentische compatibiliteit. | 54 |
| Bijlage A | | |
| natuurconstanten | | 55 |

Hoofdstuk 1

Inleiding Good Engineering Practice

1.1 Wat gaan we doen.

In dit vak worden een aantal component eigenschappen en ontwerpprocedures besproken die van belang zijn om veel gemaakte ontwerp fouten te voorkomen. Tevens wordt er aandacht besteed aan het berekenen van koellichamen. Dit vak is een vak wat bedoeld is om belangrijke onderwerpen uit de elektrotechniek te bespreken die niet of nauwelijks aan de orde komen in andere vakken. Wij als docenten team vinden wel dat deze onderwerpen de revue moeten passeren.

1.1.1 Globale inhoud van het vak

1. Componenten, en de ongewenste eigenschappen daarvan.
2. Foutberekeningen en opgave van meetgegevens.
3. Moderne component behuizingen voor en nadelen hiervan, productie technieken, en de loodvrij ellende.
4. Koelen en gekoeld worden.
5. Wat wel kan en wat niet in PCB design.
6. EM velden en hoe er rekening mee te houden. Filters.

7. Reparatie en systematisch foutzoeken.
8. Veiligheid, Chemische stoffen, wat wel kan en wat niet.

Componenten

In dit hoofdstuk worden de diverse componenten besproken. Zo gaan we in op ongewenste eigenschappen van componenten die bijvoorbeeld in het boek van Hambley [1,] niet besproken worden.

Behuizingen

SMD versus through hole componenten, rework en repareren. Ball Grid Array's en dergelijke moderne trends komen ook aan de orde. Klein Kleiner en kleinste componenten, coderingen en kretten.

Koelen

Het berekenen van koelplaten, gebruikte materialen en hoe de specificaties te lezen. Hoe worden ze gemonteerd wat kan wel wat kan niet.

EM velden en filters.

In dit gedeelte wordt een aantal handvatten gegeven om een goed ontwerp neer te zetten zodat invloeden van buiten af worden beperkt. Er zal ook even ingegaan worden op ESD.

Foutzoeken

Hoe zoek je nu fouten, welke methoden zijn er voor.

Veiligheid

Last but not least is dit een erg belangrijk onderwerp. Er worden in de elektronische industrie stoffen gebruikt die een gevaar voor de gezondheid zijn. Wat kun je tegenkomen en hoe ga je hier mee om.

Hoofdstuk 2

Componenten

2.1 Welke zijn er allemaal.

Om maar met een rijtje te beginnen zijn er de navolgende:

- Weerstand.
- Spoel.
- Condensator.
- Transformator.
- Transistoren.
- Dioden.
- Thyristoren.
- digiloge poorten.
- etc.

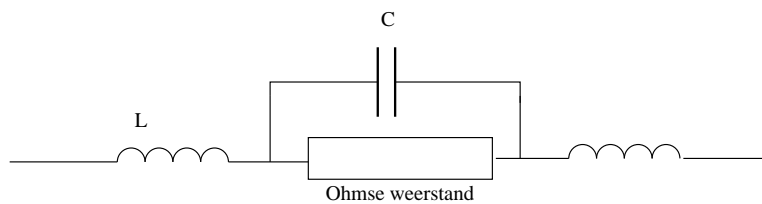
En deze lijst is niet limitatief maar er zijn nog vele andere componenten zoals bijvoorbeeld vacuüm buizen.

2.2 De weerstand

2.2.1 Weerstand

Wat is weerstand? Weerstand is een behoorlijk complex verschijnsel. Zo zou je het geleerde van het vak signalen 2 kunnen gebruiken om de weerstand formeel af te leiden. Hiervoor wordt verwezen naar [2, pag 11].

De theoretische aspecten van weerstand zijn verder niet echt interessant voor een HBO elektronicus/energietechnicus. Het gaat meer om de eigenschappen en waar je op moet letten. Veel elektronici zien een weerstand als weerstand maar helaas is dat niet waar. Een weerstand is niet zomaar een draadje dat niet optimaal geleid, er treden verliezen op, er zijn capaciteiten en inductiviteiten die van de constructie afhangen. In het volgende plaatje is een werkelijke weerstand getekend, wat opvalt is dat de parasitaire eigenschappen direct kunnen worden doorgetrokken naar condensatoren, spoelen en halfgeleiders. De getekende spoel(en) worden veroorzaakt door de aansluitdraden



Figuur 2.1: De werkelijke weerstand.

en eventueel de constructie van de weerstand zelf. De condensator door de capacatieve koppeling van de aansluitdraden onderling en ook door de constructie. Zo zal de lezer begrijpen dat een draadgewonden weerstand meer inductie veroorzaakt dan een opgedampte koolweerstand. De parasitaire componenten zoals de spoelen en condensator worden genoemd kunnen voor lage frequenties wel buiten beschouwing worden gelaten. Voor hogere frequenties (boven ca 50 MHz) spelen ze echt wel.

2.2.2 Dissipatie in weerstanden

Weerstanden worden in diverse modellen gemaakt met elk zijn eigenschappen. Zo zijn er standaard weerstandjes, zoals die op school worden gebruikt, vaak slechts geschikt voor een 1/8 Watt, zie ook figuur 2.2. Dat betekent dat de uitkomst van formule 2.1 niet groter mag zijn dan 0,125 Watt.

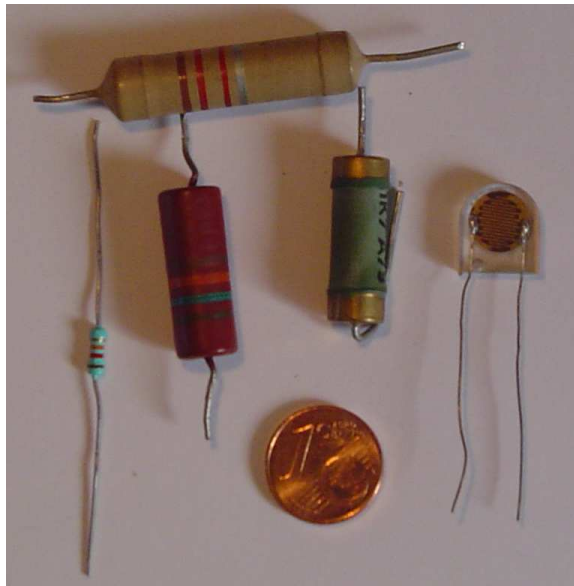
$$P = I^2 \cdot R \quad (2.1)$$

Dus als ik 1 mA door een 1 K weerstand laat lopen dan krijg je:

$$P = (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Watt}$$

Het is dan makkelijk te zien dat je bij 10 mA een 100 mW moet gaan dissiperen en dat je dan al dicht in de buurt komt van de maximale dissipatie.

Bij 100 mA komt de derde wet van Kirchoff¹ om de hoek kijken. Van dit opwarmen wordt ook wel eens handig gebruik gemaakt. Zo zijn er thermische zekeringen, of weerstanden die met een speciaal soldeer gesoldeerd zijn, waardoor na te warm worden de verbinding onderbroken wordt.



Figuur 2.2: De verschillende weerstanden.

¹Als het rookt is de stroom te hoog

2.2.3 Soorten weerstanden

Uit de natuurkunde volgt dat een weerstandswaarde wordt bepaald door:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

In de formule 2.2 wordt de weerstand bepaald door:

de soortelijke weerstand van het materiaal ρ in Ohm meter. De lengte, l , van het materiaal, en het oppervlak A , van de doorsnede. Nu is de soortelijke weerstand temperatuur afhankelijk. Dus als de temperatuur omhoog gaat dan kan de weerstandswaarde groter, en soms kleiner, worden. Nu heeft het International Electrotechnical Committee (IEC) bepaald dat de nominale werktemperatuur 70 graden Celsius is voor weerstanden. Dit betekent dat de waarde die uit de kleurcode² of andere opdruk gehaald wordt tot circa 70°C gegarandeerd is. Omdat weerstanden in waarde veranderen door dat de temperatuur veranderd moet er bij vermogens weerstanden rekening worden gehouden hoe ze gemonteerd worden. Er zijn ook speciale weerstanden die hier gebruik van maken:

De NTC en PTC weerstand

De Negatieve Temperatuur Coefficient [NTC] weerstand heeft zoals de naam al doet vermoeden een negatieve temperatuur coefficient, hetgeen betekent dat de weerstandswaarde daalt als de temperatuur omhoog gaat. De benaming van de PTC spreekt dan voor zich. Dit type weerstanden worden ook wel een thermistors genoemd. Deze weerstanden worden gemaakt van een mix van halfgeleidende metaal oxiden. Meestal worden mangaan nikkel koper verbindingen gebruikt. De weerstand waarde is dan een polynoom die afhankelijk is van de temperatuur.

$$R_T = \left[\frac{\alpha}{T} + \frac{\beta}{T^2} + \frac{\gamma}{T^3} + \dots \right] \quad (2.3)$$

De constanten α β en γ zijn dan respectievelijk negatief of positief, afhankelijk van de soort R. NTC weerstanden vinden hun toepassing in inschakelstroom beperking, temperatuur meting etc. PTC weerstanden worden gebruikt in demagnetisatie circuits, vloeistof stromings metingen etc.

²Zie appendix 1

Andere omgeving afhankelijke weerstanden.

Andere weerstanden die je nog wel eens tegenkomt zijn VDR LDR en MDR. Hier wordt niet al te diep op ingegaan alleen dat ze bestaan en wat de afkorting betekend.

- VDR Voltage Dependent Resistor.
- LDR Light dependent resistor.
- MDR Magentic dependent resistor.

2.3 Skineffect

Bij gelijkstroom kun je er vanuit gaan dat de stroomdichtheid over de doorsnede constant is. Bij wisselstroom is dit helaas niet zo en dat vindt zijn oorzaak in het feit dat elektronen elkaar niet kunnen uitstaan. Uit de wetten van Maxwell volgt namelijk dat een wisselstroom zich niet lineair verdeeld over de geleider en zich als een golfverschijnsel beweegt over de geleider. De stroomverdringing die optreedt vindt zijn oorzaak in de door de stroom opgewekte velden. Zonder het te bewijzen is de indringdiepte[3, pag 242-243] voor wisselstromen gegeven door:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_c \sigma_c}} \quad (2.4)$$

In deze formule: μ_c in Henry/meter is de permeabiliteit van het materiaal en σ_c in Siemens/meter³ is de soortelijke geleiding van het materiaal. De δ is de indringdiepte in meters.

- **Opgave** Bepaal de indringdiepte van een koperen geleider op 50 Hz en 1 KHz en 100 Mhz. Hoe wordt de weerstand van de geleider beïnvloed door de indringdiepte?
De soortelijke geleiding van koper is: $\sigma = 58139535 S/m$

³Wordt ook wel eens aangegeven met \mathcal{U} en is eigenlijk 1/weerstand

2.4 De condensator.

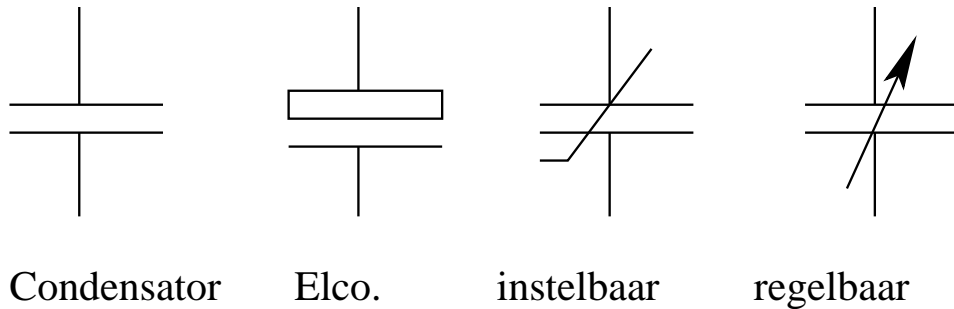
Een ander belangrijk component is de condensator. Een condensator bestaat per definitie uit minimaal twee geleiders gescheiden door een isolator. Er zijn vele types condensator elk met zijn specifieke eigenschappen. Zo heb je elektrolytische condensatoren, Keramische, gold capjes afstem condensatoren X en Y condensatoren etc. We zullen de belangrijkste eigenschappen van veel gebruikte typen op een rij zetten.

2.4.1 De natuurkundige beschrijving van de condensator

De meest simpele condensator bestaat dus uit 2 geleiders en een isolator die we ook dielectricum noemen. Een condensator kan gebruikt worden voor lading opslag. Deze lading opslag is lineair afhankelijk van de aangelegde spanning. In formule vorm:

$$q = C \cdot u \text{ of } C = \frac{q}{u} \quad (2.5)$$

Met in de formule q de lading in Coulomb, C de capaciteit in Farad en u de spanning over de platen.



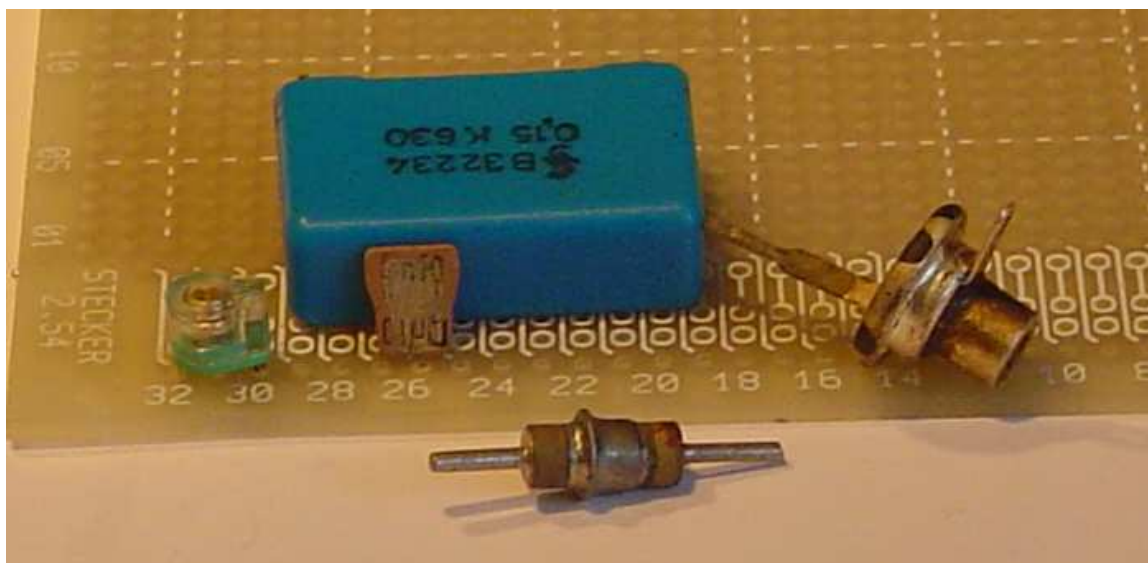
Figuur 2.3: Het schemasymbool.

De normale condensator, in het figuur 2.3 de meest linkse, wordt veel gebruikt om signaal paden te koppelen. De Elektrolytische Condensator levert veel capaciteit in een klein volume. Deze condensatoren zijn polair.

Dat wil zeggen dat je de plus en min van de elco goed moet aansluiten, verkeerd om is destructief, en kan veel schade veroorzaken aan mens en goed. Ze knallen soms met een behoorlijk klap uit elkaar, of ploffen door de zwakke punten die er in gemaakt zijn. Zoals bij figuur 2.4 het rode ventiel. De instelbare en continue regelbare condensatoren worden gebruikt in afstembare schakelingen. Zie ook de bijgaande plaatjes.



Figuur 2.4: De afvlak elco.



Figuur 2.5: Diverse condensatoren.

In het bovenstaande plaatje worden diverse condensatoren getoond. Van links naar rechts:

- de zogenaamde sky trimmer, Deze trimmer is inductie arm en wordt met name gebruikt in het afregelen van hoogfrequent elektronica. Tussen de draaibare platen zit een teflon folie.
- De puls condensator. Deze worden gebruikt in hoogspannings systemen. De waarde van die C blijkt uit de opdruk, 0,15 K (= 15 nanoFarad KiloPico)
- Bij het nummer 26 staat een zogenaamde trapezium C, dit is de C die in een sleufje van een print wordt geschoven zodat het print spoortje er tegenaan gesoldeerd wordt. Extreem inductie arm is deze constructie.
- Voor de PCB ligt een doorvoer condensator. Deze wordt gebruikt om een voedingsspanning in een afgeschermd gedeelte te krijgen.
- En uiterst rechts is een mica condensator, met op de rand een kleurcode.

2.4.2 De Effectieve Serie Weerstand [ESR].

Een belangrijke eigenschap van condensatoren is de zogenaamde effectieve serie weerstand. Deze weerstand bepaald hoe snel een condensator kan worden opgeladen en worden ontladen. Zo hebben keramische condensatoren een veel lagere ESR dan elco's als je op een printje kijkt waar veel geïntegreerde schakelingen opzitten dan kom je vaak keramische c-tjes tegen bij de ic's. Dit zijn de zogenaamde inrush c'tjes. Omdat printsporen een lengte, dikte en breedte, hebben en dus een weerstand, zij het lage, vormen. Deze weerstand zorgt ervoor dat er bij een schakelactie een spanningsdipje zou ontstaan die over het print spoor reist. Deze dip zou een probleem kunnen veroorzaken in de totale schakeling. Op het moment van schakelen is de stroom vraag hoog. De inrush C levert even tijdelijk deze stroom, zodat de voeding het kan bijsloffen. Als de ESR hoog zou zijn kan de lading niet snel genoeg uit de condensator komen. We praten hier over verschijnselen die in de nano seconde sfeer hangen.

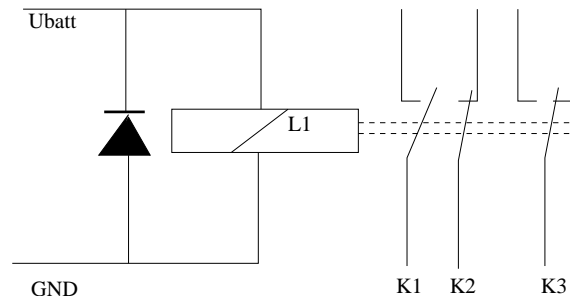
Derhalve wordt er altijd een C gekozen met lage ESR en zeer vaak een keramische condensator van ca 10 nF. Hele volksstammen noemen dit een ontstorings condensator, deze benaming is onjuist. Er stoort niks, er wordt alleen even een grote stroom gevraagd, vandaar een dat professionals dit een inrush C noemen.

- **Opdracht:**

1. Zoek van diverse condensator typen de ESR op, meestal staat dit in de datasheet. Vishay is een grote fabrikant van passieve componenten.
2. Bepaal de spannings dip bij een elco als de esr ca 1 ohm is en de verschilstroom 100mA. De maximum stroom wordt bereikt na 1 nanoseconde. De elco heeft een waarde van 1000 micro farrad en zijn nominale werkspanning is 10 volt. Ga er voor de eenvoud van uit dat dit een lineair verschijnsel is. De stroom is gedefinieerd als $\Delta Q/\Delta t$

2.5 De spoel.

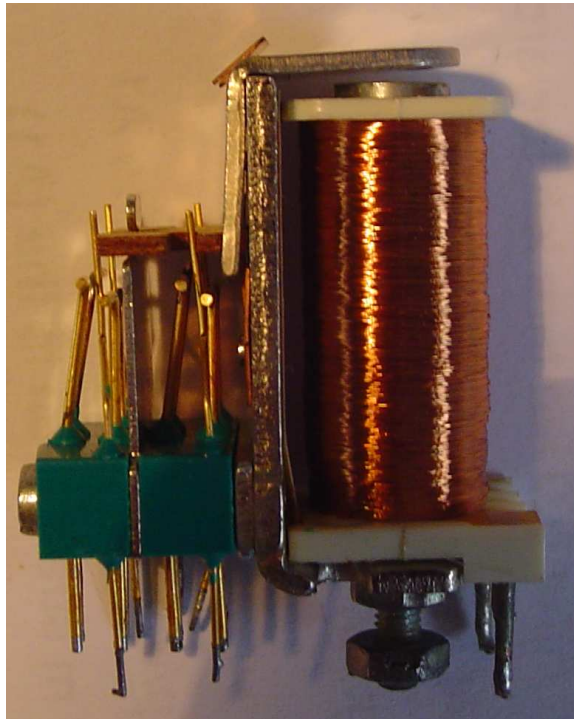
Een spoel is simpel gezegd een bos draad met een ruimte daartussen. Er wordt bij een spoel een magneetveld opgewekt en dit kan wel eens voor problemen zorgen. Dit magneetveld kan worden gebruikt vanwege de interactie op ijzer en ijzer bevattende delen. Zo wordt een spoel gebruikt in een relais. Als de spoel onder spanning staat wordt het juk aangetrokken waardoor de schakelaar om gaat. Nu is het in elektronica erg belangrijk om over gelijkspannings gevoede relais een diode te zetten. Bij het weghalen van de spanning zal het magneet veld proberen om zich zelf in stand te houden en dat resulteert in een zogenaamde tegen EMK. Deze tegen EMK is een spanning die tegengesteld staat aan de normale spanning en dat is vaak onwenselijk. Dus wordt er een diode in serie overheen gezet. Zie ook de figuur 2.6



Figuur 2.6: Het relais schemasymbool.

De uitgebreide schemasymbolen staan in de Nederlandse norm NEN 5152. In de tekening staat L1 voor de spoel, K1 voor een maakcontact, K2 voor een verbreekcontact en K3 voor een wisselcontact. Vaak worden relais alleen maar met wisselcontacten uitgevoerd, omdat je dan alle drie de mogelijkheden hebt. Want een wisselcontact is gewoon een samenstel van een maak en verbreek contact.

Een ander voorbeeld van spoelen is de zogenaamde ontstoorspoel. Deze worden gebruikt in twee configuraties. Namelijk de common mode spoel en de differentialmode spoel.



Figuur 2.7: Het relais.

Differential Mode

Dit is de student waarschijnlijk bekend, een stroom loopt in een stroomkring. Dus als er een stroom heen gaat moet hij ook terugkomen. En meestal gaat dit over het zelfde aderpaar. Zoals in een netsnoer, over de phase stroomt de stroom het apparaat in en door de nu weer terug, voor de puristen bij wisselstroom verandert dit met de halve periode. Dit is de zogenaamde differential mode, I_{dm} , stroom. In het hoofdstuk over pcb design komen we hier nog uitgebreid over terug.

Common Mode

Bij deze stroom loopt er over het geheel van geleiders een stroom, waarbij de stroomkring over een compleet andere weg gesloten wordt. Heel veel EMC en interferentie problemen ontstaan hierdoor. Zo is het wel denkbaar dat er storing op een tv optreedt waarbij een common mode stroom, I_{cm} ,

loopt over de buitenmantel van de coaxiale kabel van de TV via de dolby surround set terug het elektriciteits net in, en dan weer naar buiten komt in de kabeltelevisie verdeel inrichting in de straat. Dit soort stromen kunnen amperes zijn. Je kunt ze vaak ook niet meten via een ampere metertje en/of scoop. Je hebt hier een spectrum analyzer voor nodig met een EM clamp.

2.6 De common mode choke

De choke, het engelse woord voor smoorspoel, wordt gebruikt om zogenaamde common mode stromen een hoge impedantie te laten zien.



Figuur 2.8: De common mode choke.

In het figuur 2.8 is een common mode spoel te zien. Een stroom die over beide geleiders binnen komt ziet een hoge impedantie. En voor de differentiaal mode stromen die er door heen gaan wordt een lage impedantie gezien omdat de velden veroorzaakt door de I_{dm} worden opgeheven.

- **Opdracht** Onderzoek door middel van de kurkentrekker regel hoe de velden in de spoel staan van figuur 2.8 bij commonmode en Differential mode.

Het zal u opvallen dat de draden niet geïsoleerd lijken te zijn. Dat zijn ze echter wel maar met schellak⁴. Schellak ontleed zijn naam aan een oud woord voor deurbel, schel, en de lak die daar gebruikt bij werd om het spoeltje van de hamer die op de schel sloeg te isoleren. Dit met schellak geïsoleerde draad is niet goed te solderen. Dat lukt wel als je het op een echt aspirientje legt. Het zuur en de hitte lossen de schellak op en dan is het koper soldeerbaar. Paracetamol en andere pijnstillers werken niet.

Tegenwoordig wordt de schellak synthetisch gemaakt. Zo zijn er vele smoorspoelen, Hoogfrequent isolatoren en dergelijk spoelen.

2.7 Opdrachten:

1. Onderzoek wat de nadelen zijn van draadgewonden weerstanden ten opzichte van de koolcomposiet weerstanden.
2. Onderzoek de verschillen tussen normale elco's en de tantaal elco.
3. Bereken of simuleer wat de resonantie frequentie is van het volgende netwerkje. De keramische condensator van 10 nF wordt met pootjes van 1 cm op de print gezet. Een bruikbare vuistregel is dat er ca 1nH zelf inductie is per milimeter.
4. Een groot probleem bij smoorspoelen is de verzadiging van het kern materiaal. Hoe ontstaat deze verzadiging? Hint, zoek eens naar de BH kromme.

⁴Schellak is een natuur-product dat wordt gemaakt uit een hars achtig goedje wat door insecten uit Thailand, India en omstreken wordt uitgescheiden op bepaalde bomen.

Hoofdstuk 3

Foutberekening en opgave van meetgegevens.

3.1 Inleiding.

Bij ieder experiment worden fouten gemaakt; zelfs al zou de gebruikte apparatuur ideaal zijn, dan nog zijn er fouten, die door de waarnemer zelf gemaakt worden, zoals fouten bij aflezingen, mogelijk gebruik van een verkeerde formule, die voor het beschouwde geval slechts een benadering is, rekenfouten e.d. Deze fouten hebben tot gevolg, dat ook het eindresultaat van het experiment fout is. De experimentator moet bij zijn opgave van het eindresultaat tevens opgeven hoe groot de fout is; doet hij dat niet, dan is zijn opgave zeer onvolledig en eigenlijk zinloos.

Het nu volgende zal handelen over de vraag, hoe de fout in het eindresultaat kan worden berekend, voorzover het eindresultaat in de vorm van een getal wordt weergegeven. Dit hoofdstuk is gebaseerd op het diktaat foutberekening dat geschreven is door ir. C. de Boer, oud docent aan de HTS 'A'.

3.2 Fouten systematisch of toevallig.

Bij een experiment kan het voorkomen, dat er een fout gemaakt wordt, die bij herhaling van het experiment weer aanwezig is (met dezelfde grootte en werkend in dezelfde richting), wanneer aan de meetmethode van het experiment niets veranderd wordt.

Denk bijvoorbeeld aan de spanningmeting waarbij een voltmeter gebruikt wordt, die zelf stroom opneemt. Aangezien deze stroom er niet behoort te zijn (de voltmeter is voor het systeem een voor de meting noodzakelijke ‘indringer’, en het systeem zich dus anders gedraagt dan normaal (d.w.z. zonder voltmeter) is het mogelijk dat de voltmeter een merkbaar te lage spanning aanwijst. Bij herhaling van de meting met dezelfde meetmethode zal dezelfde afwijking geconstateerd worden. Aangezien deze fout bij de gebruikte meetmethode systematisch optreedt noemen we zo’n fout een **systematische fout**.

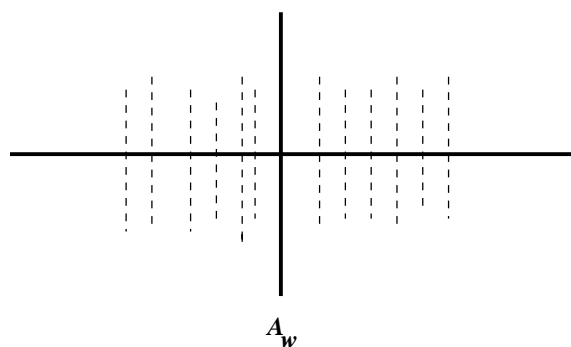
Andere voorbeelden van systematische fouten zijn: een niet gecorrigeerd nulpunt van een meter, een rekenfout, gebruik van een verkeerde formule bij de uitwerking van de meetresultaten.

Het is mogelijk, dat bij een experiment of bij de uitwerking ervan geen systematische fouten optreden, maar dan worden toch nog altijd fouten gemaakt van een andere soort, de toevallige fouten.

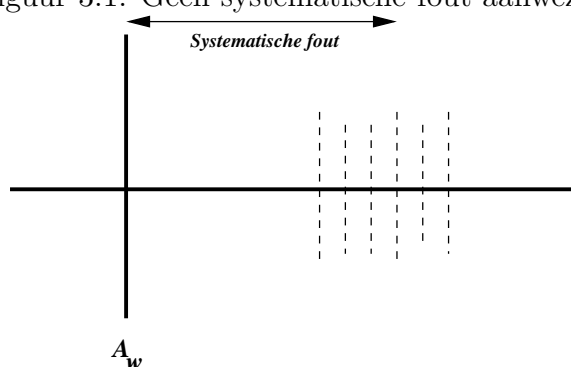
Een toevallige fout is altijd aanwezig, maar bij herhaling van het experiment (met al of niet dezelfde meetmethode) is de fout over het algemeen anders van grootte en/of van richting. Die verandering wordt geheel door het toeval bepaald.

Tengevolge hiervan vertoont een reeks waarnemingen aan een grootte (b.v. een temperatuur) altijd een natuurlijke spreiding, die sterk afhankelijk zal zijn van de nauwkeurigheid van de meetmethode.

Figuur 3.1 licht het bovenstaande toe. Als er geen systematische fout gemaakt is liggen de waarnemingen aan de grootte \mathbf{a} rond de werkelijke waarde van \mathbf{a} (\mathbf{a}_w). Het gemiddelde van de waarnemingen zal ongeveer gelijk zijn aan. Als er wel een systematische fout is gemaakt bestaat er een duidelijke (systematische) afwijking van, zie figuur 3.2, het gemiddelde van de waarnemingen ten opzichte van \mathbf{a}_w . Het aandeel van systematische fouten in het eindresultaat van het experiment kan niet met de hierna volgende methode berekend worden; we moeten zorgen, dat ze niet optreden. Dat gaat echter lang niet altijd zo gemakkelijk als het misschien lijkt.



Figuur 3.1: Geen systematische fout aanwezig.



Figuur 3.2: Systematische fout aanwezig.

We moeten proberen ze te vermijden en er bij het kiezen van de meetmethode goed op bedacht zijn, dat bepaalde systematische fouten kunnen optreden.

Het aandeel van toevallige fouten kan echter wel berekend worden, juist door hun toevallige karakter en wel door middel van de waarschijnlijkheidsrekening.

3.3 Spreiding en toevallige fouten.

Stel, dat bij een experiment o.a. de grootte \mathbf{x} moet worden bepaald. Het streven is dan de werkelijke waarde van \mathbf{x} te achterhalen \mathbf{x}_w . Dat kan echter alleen als er oneindig veel waarnemingen aan \mathbf{x} worden verricht. Het rekenkundig gemiddelde van deze waarnemingen zal dan gelijk zijn aan \mathbf{x}_w (als er tenminste geen systematische fout gemaakt wordt).

In de praktijk moeten we ons natuurlijk tevreden stellen met een eindig aantal waarnemingen zodat het vinden van x_w principieel onmogelijk is. Als er n waarnemingen aan x gedaan worden, geven we het rekenkundig gemiddelde \bar{x} op als de beste waarde voor x_w met:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ met } (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.1)$$

Als maat voor de spreiding in de waarnemingsreeks gebruiken we de standaard afwijking volgens:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

Na enige herleiding ontstaat de meer hanteerbare uitdrukking:

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1} (\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad (3.3)$$

Met $\overline{x^2}$ is het gemiddelde kwadraat en \bar{x}^2 het kwadraat van het gemiddelde.

Deze s is (voor $n \gg 1$) niet afhankelijk van n , maar wel van de nauwkeurigheid van de meetmethode; hoe nauwkeuriger de methode hoe kleiner s . Wanneer de reeks van n waarnemingen een aantal malen als geheel zou worden herhaald zou dat evenveel waarden voor \bar{x} opleveren die onderling ook weer een spreiding vertonen. Als maat voor deze spreiding bestaat de standaardafwijking van het gemiddelde of de middelbare fout s_m . Tussen s en s_m bestaat het verband:

$$s_m = \frac{s}{\sqrt{n}} \text{ en dus } s_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} (\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad (3.4)$$

Aangezien we \bar{x} opgeven is s_m een maat voor de fout van \bar{x} de afwijking ten opzichte van x_w . We geven nu een interval op volgens $x_w = x \pm \Delta x$ waarbij Δx de fout van x wordt genoemd en waarvan de grootte bepaald wordt door s_m . Om nu een kans van 95 procent te hebben dat x in het opgeven interval ligt nemen we $\Delta x = 2s_m$ (zie statistiek). Op deze manier

kunnen voor alle grootheden, die bij een experiment gemeten moeten worden ($x_1, x_2, x_3 \dots, x_k$) de fouten ($\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3 \dots, \Delta x_k$) berekend worden.

Om s_m volgens formule 3.4 te berekenen is nogal wat rekenwerk vereist, maar er bestaat een benadering die voor de foutberekening goed voldoet. We gaan hierbij uit van:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (3.5)$$

Uit de statistiek blijkt nu, dat met een goede benadering voor s_m geldt:

$$s_m = \frac{5}{4} \frac{r}{\sqrt{n-1}} \quad (3.6)$$

Als het nodig is, kan hieruit een overeenkomstige uitdrukking voor s worden afgeleid volgens $s = s_m \sqrt{n}$:

$$s = \frac{5}{4} r \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (3.7)$$

In plaats van formule 3.4 kan dus de minder rekenwerk vragende uitdrukking 3.6 gebruikt worden. Voor gevallen, dat er maar één waarneming wordt gedaan ($n = 1$) gaat het bovenstaande niet meer op en moet de fout van de waarneming geschat worden, zoals bijvoorbeeld bij een éénmalige aflezing van een wijzerstand langs een schaalverdeling. Hierbij kunnen constructieve problemen als een de zogenaamde parallax een rol spelen, waarop hier niet nader wordt ingegaan. Vaak geeft de fabrikant van het betreffende apparaat de fout op in de begeleidende documentatie.

3.4 Foutvoortplanting

Als alle k grootheden ($x_1, x_2, x_3 \dots, x_k$) zijn gemeten moeten ze meestal worden gecombineerd tot het eindresultaat E van het experiment, waarbij dan geldt:

$$E = E(x_1, x_2, x_3 \dots, x_k) \quad (3.8)$$

De vraag is nu, hoe alle fouten Δx_i , gecombineerd moeten worden tot de fout van $E(\Delta E)$. Afgeleid kan worden, dat geldt:

$$(\Delta E)^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial E}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2 \quad (3.9)$$

28HOOFDSTUK 3. FOUTBEREKENING EN OPGAVE VAN MEETGEGEVENS.

We noemen formule 3.9 de **foutvoortplantingsformule**. Hij geldt alleen als de toevallige fouten onderling onafhankelijk zijn. Dat hoeft in de praktijk niet altijd het geval te zijn, denk b.v. aan de bepaling van lengte en breedte van een plaatje, waarbij afleesfouten niet de enige oorzaak van de spreiding in de waarnemingen behoeven te zijn maar ook b.v. variaties van een grootheid, die op lengte en breedte dezelfde invloed uitoefend (b.v. de temperatuur). Over het algemeen zullen, we echter aannemen, dat de fouten onafhankelijk zijn.

De fout, zoals in het voorgaande beschreven, dus $\Delta x, \Delta E$ enz. noemen we de **absolute fout**. Ook kennen we de **relatieve fout**, gedefinieerd als de absolute fout gedeeld door de modulus van de geschatte waarde zelf, symbool:

$$\frac{\Delta x}{x}, \frac{\Delta E}{E} \quad (3.10)$$

We krijgen, de procentuele fout in procenten door de relatieve fout met 100 te vermenigvuldigen. De begrippen relatieve en procentuele fout worden overigens veel door elkaar gebruikt (b.v. relatieve fout in procenten). De foutvoortplantingsformule 3.9 leidt voor een aantal veel voorkomende gevallen tot de volgende resultaten (**a** en **b** zijn gemeten grootheden en **E** is het eindresultaat):

| Bewerking | E | ΔE | $\frac{\Delta E}{E}$ |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| Optellen en aftrekken | $a \pm b$ | $\sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$ | |
| Vermenigvuldigen en delen | $a \cdot b, \frac{a}{b}$ | | $\sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2}$ |
| Machtsverheffen en worteltrekken | a^n | $ n \cdot a^{n-1} \Delta a$ | $ n \frac{\Delta a}{ a }$ |

Het verdient aanbeveling, de regels van voorgaande tabel uit het hoofd te leren, teneinde ze altijd bij de hand te hebben, waardoor voor eenvoudige gevallen het toepassen van de foutvoortplantingsformule vermeden kan worden. Voorzichtigheid is hierbij echter geboden, omdat deze regels alleen tot het juiste resultaat leiden als alle termen in de betreffende uitdrukking onafhankelijk van elkaar zijn.

Om dit te verduidelijken beschouwen we het volgende probleem:

$$E = \frac{a}{a+b} \quad (3.11)$$

We zien dat eerst quotiënt van de twee factoren a en $(a+b)$ en er volgt voor de fout volgens de deel regel van de tabel:

$$\frac{\Delta E}{E} = \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(a+b)}{a+b}\right)^2 \quad (3.12)$$

Voor de tweede term van het rechter lid van 3.12 kunnen we volgens de optelregel van de tabel schrijven:

$$\left(\frac{\Delta(a+b)}{a+b}\right)^2 = \frac{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}{(a+b)^2} \quad (3.13)$$

Zodat we krijgen:

$$\frac{\Delta(E)}{E} = \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \frac{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}{(a+b)^2} \quad (3.14)$$

Voor de absolute fout volgt dan volgens $E = \frac{\Delta E}{E} \cdot E$

$$(\Delta E)^2 = \frac{[(a+b)^2 + a^2] \cdot (\Delta a)^2 + a^2 \cdot (\Delta b)^2}{(a+b)^4} \quad (3.15)$$

We merken nu op, dat teller en noemer van 3.11 afhankelijk zijn (a in teller en noemer). Waren we nu begonnen om de afhankelijkheid er uit te delen, dus door teller en noemer te delen door a dan hadden we gekregen:

$$E = \frac{1}{1 + b/a} \quad (3.16)$$

30HOOFDSTUK 3. FOUTBEREKENING EN OPGAVE VAN MEETGEGEVENS.

Noemen we $b/a = p$ en dus $E = \frac{1}{1+p}$ dan is volgens de regel voor deling:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 &= \left(\frac{\Delta(1+p)}{1+p}\right)^2 \\ &= \left(\frac{\Delta p}{1+p}\right)^2 \\ &= \left(\frac{\frac{\Delta b}{a}}{1+\frac{b}{a}}\right)^2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Verder geldt dat:

$$\left(\frac{b}{a}\right)^2 = \frac{b^2}{a^2} \cdot \left[\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 \right] \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = b^2 \cdot \frac{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2}{(a+b)^2} \quad (3.19)$$

Voor ΔE volgt dan:

$$(\Delta E)^2 = \frac{b^2(\Delta a)^2 + a^2(\Delta b)^2}{(a+b)^4} \quad (3.20)$$

Er is dus verschil tussen 3.15 en 3.20 waarbij de laatste als juist moet worden gekenmerkt. We hadden de regel voor deling niet direct mogen toepassen, omdat teller en noemer van 3.11 afhankelijk zijn. Passen we tenslotte de foutvoortplantingsformule toe op 3.11

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \frac{b}{(a+b)^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = \frac{-a}{(a+b)^2} \text{ en dus volgens 3.9} \quad (3.21)$$

$$(\Delta E)^2 = \frac{b^2(\Delta a)^2 + a^2(\Delta b)^2}{(a+b)^4}$$

De foutvoortplantingsformule levert hetzelfde (en dus het juiste) resultaat op als 3.20.

Samenvattend kunnen we zeggen, dat de regels van de tabel kunnen worden toegepast op uitdrukkingen, waarin een bepaalde grootte slechts op **één plaats** in de uitdrukking voorkomt. In alle andere gevallen moet de foutvoortplantingsformule worden toegepast, het is soms mogelijk om afhankelijkheden er uit te delen, zoals in het voorbeeld.

3.5 Opgave van het eindresultaat.

Het eindresultaat heeft de gedaante $E \pm \Delta E$; het is het resultaat van twee aparte berekeningen, namelijk de berekening die E oplevert en de foutberekening die ΔE oplevert.

We komen nu aan het probleem toe, dat niet alle cijfers van de getallen die de berekening oplevert ook betrouwbaar zijn. Alleen als $\Delta E = 0$ zijn alle verkregen cijfers voor E betrouwbaar, maar aangezien $\Delta E > 0$ moeten we beslissen welke cijfers betrouwbaar zijn en welke niet. Opgave van niet betrouwbare cijfers zou slechts leiden tot een schijnnaauwkeurigheid, waar niemand baat bij heeft. De grootte van ΔE bepaalt hoeveel cijfers voor E worden opgegeven. De algemene regel voor het aantal cijfers dat we voor E opgeven, luidt als volgt:

We geven de eerste $n+1$ cijfers van de uitkomst voor E op als niet groter is dan de halve eenheid van het n_{de} cijfer van de uitkomst voor E , waarbij n zo groot mogelijk wordt genomen. Alle nullen voor het eerste, van nul verschillende, cijfer van de uitkomst voor E worden daarbij niet meegeteld. We noemen n het aantal significante cijfers van de uitkomst E .

Aan de hand van een voorbeeld wordt het voorgaande verduidelijkt.

Uitkomst E : $E = 124,863$

Uitkomst $\Delta E = 0.032$

We beginnen bij het laatste cijfer van E :

Het zesde cijfer, de drie, de halve eenheid hiervan is $0.5 \cdot 10^{-3}$:

hetgeen kleiner is dan de fout $0.5 \cdot 10^{-3} < 0.032$.

Het vijfde cijfer, de zes, de halve eenheid hiervan is $0.5 \cdot 10^{-2}$:

hetgeen kleiner is dan de fout $0.5 \cdot 10^{-2} < 0.032$.

Het vierde cijfer, de acht, de halve eenheid hiervan is $0.5 \cdot 10^{-2}$:

hetgeen **groter** is dan de fout $0.5 \cdot 10^{-2} > 0.032$.

32HOOFDSTUK 3. FOUTBEREKENING EN OPGAVE VAN MEETGEGEVENS.

Bij dit voorbeeld blijkt dat de acht het cijfer is waarvan geldt, dat ΔE niet groter is dan de halve eenheid van het cijfer en met een zo groot mogelijke n , $n=4$. We geven nu E op met $n + 1$ cijfers. Alle cijfers behalve het laatste zijn dus significant. Het laatste cijfer is het enige niet significante cijfer. De fout wordt altijd naar boven afgerond dus: 0,032 wordt 0,035. Het eindresultaat wordt dus aldus opgegeven:

$$E = 124,86 \pm 0.035 \quad (3.22)$$

Voor verdere studie kunt u zich verdiepen in de statistiek.

We geven de eerste $n+1$ cijfers van de uitkomst voor E op als niet groter is dan de halve eenheid van het cijfer van de uitkomst voor E , waarbij n zo groot mogelijk wordt genomen. Alle nullen voor het eerste van nul verschillende cijfer van de uitkomst voor E worden daarbij niet meegeteld. We noemen n het aantal significante cijfers van de uitkomst E .

Aan de hand van een voorbeeld wordt het voorgaande verduidelijkt.

Hoofdstuk 4

Behuizingen

4.1 Inleiding.

Het hoofdstuk behuizingen valt uit één in twee delen. Namelijk het stuk waarin de component behuizingen worden doorgesproken, en het stuk waarin de elektronica in zijn geheel verdwijnt, het kastje. In het eerste gedeelte komen de praktijk van de miniaturisatie aan de orde. Diverse begrippen zoals pitch 0204 trough hole smd bga etc zullen de revue passeren. In het tweede deel zal worden ingegaan op de diverse behuizingen, voor en nadelen van de diverse materialen.

4.2 Component behuizingen.

4.2.1 introductie.

Doordat de elektronica ontwikkeling in den beginne Amerikaanse egotripperij is geweest zijn veel maten in de elektronica gebaseerd op de inch. De inch is 25,4 mm lang, en wordt aangegeven met een ". Zo is er ook de mil, dat is een duizendste inch dus 0,254 mm. Dus veel kreten die met afmetingen te maken hebben zijn inch gerelateerd. Het 19" rek, waarbij de breedte 19" is van kast met elektronica die er in komt. Deze kasten worden ook nog met hoogte eenheden of Units van 1.75" hoog beschreven. Het voordeel van de standaard afmetingen is dat e.e.a. bij diverse bedrijven zou kunnen worden ingekocht. Voorbeelden van 19 inch kasten zijn op het internet volop te vinden.

Zo wordt er ook vaak over steek (nee geen ondersteek of hoed) gesproken, pitch in het Engels. Dit is de afstand tussen de twee pootjes.

4.2.2 Terugblik.

In de begin tijd van de elektrotechniek was alles nog groot en grofstoffelijk. De eerste batterij was de pot van Pieter van Musschenbroek. Deze pot staat bekend als de leidsche fles¹ en werd gemaakt in 1746. Een volgende grote doorbraak was de telefonie in 1888 en de eerste draadloze verbinding in 1901. Marconi maakte deze verbinding met een vonken zender. Deze machines hebben weinig te doen met elektronica, maar medio 1907 werd de radio buis uitgevonden. De Engelsman, Ambrose Fleming, voegde een tweede elektrode toe aan de lamp van Edison en zoog het spul vacuüm. Deze 2de elektrode werd plaat genoemd. Vervolgens kwam de Amerikaan Lee de Forest om een derde elektrode, het rooster, toe te voegen. Het patent van 1907 is te zien op www.leedeforest.org en daar is ook wat meer historie te vinden. Dit moeten we zien als het begin van de elektronica. De uitvinding van de actieve componenten. De eerste geïntegreerde schakeling kwam medio 1920 waarbij wat weerstanden in de radio buis werden ondergebracht. Via de radio van Lee Armstrong en de tweede wereld oorlog waarbij veel elektronica werd ontwikkeld. Komen we in 1947 uit bij de uitvinding van de transistor. Deze werd uitgevonden door: John Bardeen, Walter Brattain en William Shockley en deze transistor 4.1, wordt gezien als het begin van de moderne elektronica.

En dan natuurlijk gevolgd door de eerste silicium chip in 1957 die te zien is in het plaatje 4.2 De schakelingen in de elektronica zijn via een hooiberg methode en gedrukte schakelingen gemigreerd naar surface mounted devices en hybride circuits.

¹Zie bijvoorbeeld: <http://www.ieee-virtual-museum.org>



Figuur 4.1: De eerste transistor (replica).

4.3 Productie technieken

4.3.1 Buizen en de hooibergmethode

Sinds de jaren 30 is de elektronica continue in ontwikkeling. Van groot en ruim opgezette schakelingen en grote apparaten naar steeds compacter en kleiner. Zo werden er op stukjes pertinax waarop soldeerlippen geklonken waren schakelingen gemaakt. In het figuur 4.3 is goed te zien hoe deze methode werkt. Vaak kun je op deze wijze relatief eenvoudige schakelingen maken. In de oudere apparatuur kom je dit nog vaak tegen. Ook wordt voor prototypen nog wel eens hooiberg methoden gebruikt. Dan wordt er een blanco printed circuit board gebruikt en legt men de ic's op hun rug en solderen daar de overige componenten aan. Een soort mikado voor elektrotechnici.



Figuur 4.2: De eerste silicium chip.

4.3.2 Trough hole

Een voorbeeld van de trough hole techniek is goed te zien aan het plaatje 4.4. Er moet opgemerkt worden dat hier geranium transistors worden gebruikt en het zichtbare neonlampje wordt gebruikt als stabilisator voor de spanning.

Het is duidelijk aan de vloeiende lijnen van de pcb te zien dat dit met de hand is gemaakt. De donkere zwarte lijnen zijn de sporen aan de onderkant. Omdat deze print met de hand is gemaakt staan de componenten niet in mooi raster zo als bij een modern pcb pakket.

4.3.3 smd techniek

Het printje van figuur 4.5 is een inverter voor de achtergrond lichten van een LCD scherm. Je kunt hier duidelijk zien dat deze pcb met een computer is gemaakt. Alles staat netjes recht en op een raster. De smd componenten worden gemeten met behulp van hun steek. Zo is een 06-03 component 6 bij 3 mil groot. Deze zijn nog wel met de hand te solderen. 02-04 is dat niet meer. Als je één keer niest zijn de componenten verdwenen. Een ander nadeel is dat er nauwelijks een opdruk op de componenten kan. Zo zijn de componenten gecodeerd. De website <http://www.tkb-4u.com/code/smdcode/indexsmdcode.php> is een handige plek om componenten op te zoeken. In de smd technieken is een trend te zien dat diverse ic's in 1 behuizing worden ondergebracht. Het aantal pinnen neemt gestaag toe zodat er andere behuizingen moeten worden gezocht. Als je de pinnen niet



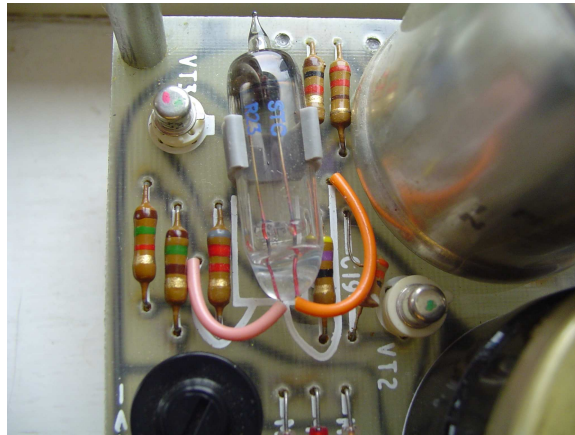
Figuur 4.3: Het buizen tijdperk.

meer aan de periferie van de behuizing kwijt kunt dan ga je toch er onder zitten.

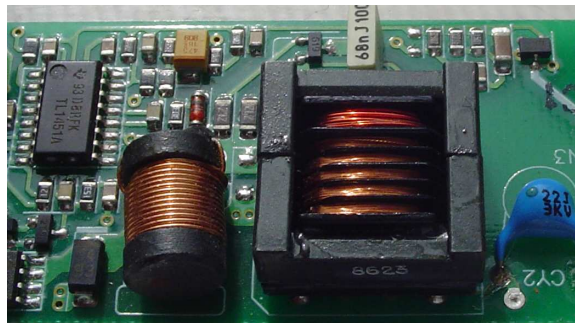
Zo is de ontwikkeling richting BGA Ball Grid Array's gekomen. Bij deze techniek zitten de aansluitingen van de chip onder op de behuizing. Deze zijn helaas niet meer met de hand te solderen. De balletjes zitten zo dicht op elkaar dat er zogenaamde tin whiskers kunnen ontstaan.

4.4 lood vrij solderen

Er is in de productie wereld een trend gaande sinds 1997 om loodvrij te solderen. Lood is een belangrijk metaal vanwege zijn smeltpunt verlagende eigenschappen. Je kunt deze eigenschap vergelijken met het zout wat 's winters op de wegen wordt gestrooit, dit zout, het zelfde spul wat aan de binnenkant zit van de paars/rose antistatische zakjes, verlaagt ook het smeltpunt. Nu is het zo dat de europese regelgeving het heeft verboden om in nieuwe producten nog lood te gebruiken. Deze richtlijn gaat in op 1 juli 2006. De richtlijn zelf gaat over het beperken van gevaarlijke stoffen in de elektronica, de complete tekst staat op <http://europa.eu.int/eur-lex> en dan even zoeken op 2002/95/EG. De implicatie van deze richtlijn is dat veel oude componenten niet meer gebruikt kunnen worden omdat deze smelten. De nieuwe soldeer middelen hebben een smelt temperatuur die gemiddeld 40 graden Celcius hoger ligt dan de loodhoudende soldeer.



Figuur 4.4: Een voorbeeld van trough hole.



Figuur 4.5: Een voorbeeld van smd techniek.

4.5 Opdrachten.

1. Welke stoffen mogen niet meer gebruikt worden in elektronica en of elektrische apparaten na 1 juli 2006.
2. Wat zijn de verschillen in de navolgende behuizingen:
 - DIL
 - SOT
 - PQFP
 - BGA
3. Wat is reflow solderen?

4. Hoe wordt soldeer pasta aangebracht?
5. Wat is de samenstelling van het huidige soldeer en dat van een lood-vrijsoldeer?
6. Wat zijn tin whiskers?

Hoofdstuk 5

Koelen en gekoeld worden.

5.1 Inleiding.

Uit de formule 2.1 blijkt dat er in elektronische componenten warmte wordt ontwikkeld. Dit geldt voor alle componenten die enige weerstand hebben of magnetische of elektrische verliezen. Zoals bijvoorbeeld over een spanningsregelaar die van 8 volt 5 volt maakt bij een stroom van 1 Ampere. Dit betekent dat er in dat component 3 Watt, $I \cdot U_{\text{verschil}}$ aan warmte wordt ontwikkeld. Deze warmte moet afgevoerd worden om te voorkomen dat het component defect geraakt. Zo blijkt uit de basis formule voor een diode een, [1, pag 157], dat de stroom I_D afhangt van de temperatuur.

$$I_D = I_s \left[e^{\frac{v_d}{n \cdot V_T}} - 1 \right] \quad (5.1)$$

$$V_T = \frac{\kappa \cdot T}{q} \quad (5.2)$$

In deze formule zijn: I_s De verzadigings stroom, voor kleine diodes 10^{-14} Ampere.

v_d de spanning over de diode

n de emissie coefficient deze ligt meestal tussen 1 en 2

κ De constante van Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/kelvin

q de lading van een electron $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

T De temperatuur in Kelvin.

Als de temperatuur omhoog gaat zal V_T groter worden en dat resulteert vaak het defect raken van de halfgeleider. Een toegestane p-n overgangstemperatuur is meestal 150 graden celsius. Dus is het van belang om warmte op een gecontroleerde wijze af te voeren.

5.2 Warmteleer.

In dit stuk van de natuurkunde wordt uitgegaan van een thermische energie transport van hogere naar lagere temperatuur. Anders gezegd Warmte stroomt in de richting van afnemende temperatuur. Warmte stroom en thermodynamica zijn twee verschillende dingen. Thermodynamica houdt zich met name bezig met systemen die in evenwicht zijn. Bij thermodynamica wordt bijvoorbeeld uitgerekend hoeveel warmte er nodig is om een systeem uit evenwicht te krijgen en in een andere toestand te brengen. Dat gaan we dus niet doen, wij houden ons bezig met warmte overdracht.

Warmte overdracht kan plaats vinden op drie verschillende manieren.

- **Straling:** Een ieder kent wel dat heerlijke gevoel als de zon even op de huid schijnt.
- **Convectie:** Warmte transport via de lucht die opwarmt en daardoor in beweging komt.
- **Geleiding:** Warmte transport door trillende moleculen in een kristalrooster of vloeistof. De vloeistof stroomt in dit geval niet.

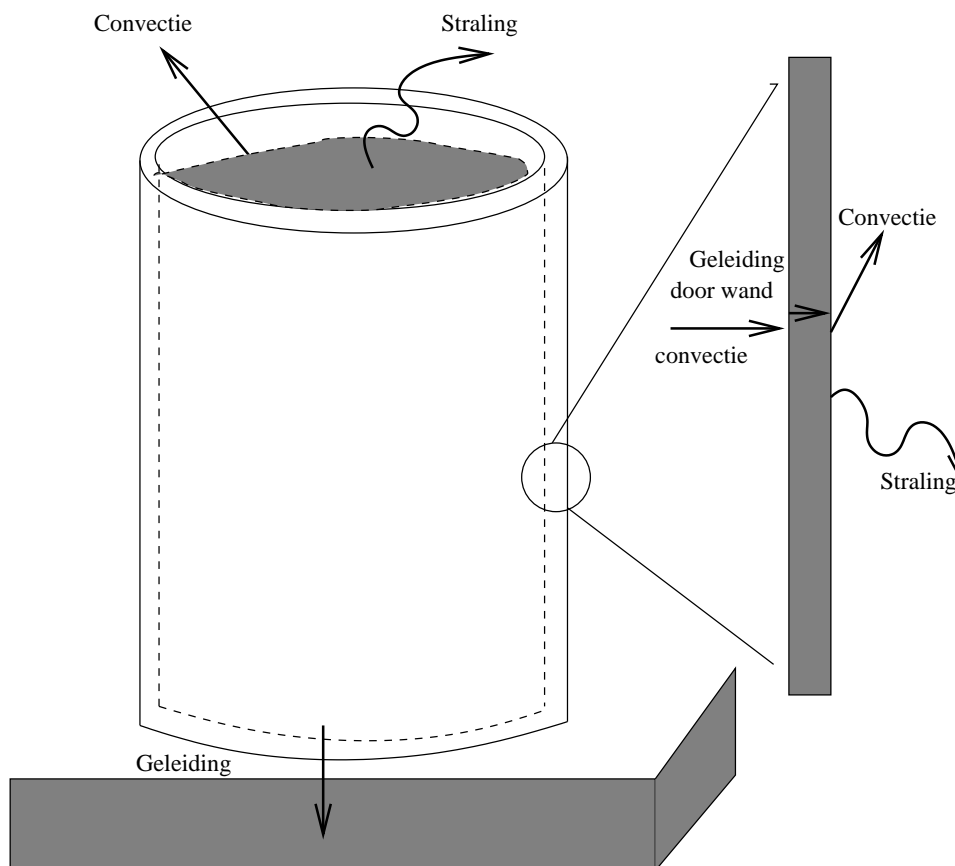
In het plaatje, figuur: 5.1, staan de diverse systemen van warmte transport nog eens aangegeven. Het kopje is bijvoorbeeld gevuld met een hete drank.

5.2.1 Geleiding.

Beschouw het plaatje, figuur: 5.2 De zijde gelegen op X_1 heeft temperatuur T_1 en analoog voor X_2 en T_2 . Het warmte transport gaat dus in positieve x richting. Uit experimenteel onderzoek blijkt dat het warmte transport evenredig is met het oppervlak en het temperatuur gradient¹

$$\dot{Q} \propto -A \frac{\Delta T}{\Delta X} = -A \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} \quad (5.3)$$

¹Hier wordt over gradient gesproken omdat het wiskundig gezien een vector is, het heeft grote en richting, maar je kunt ook verschil lezen.



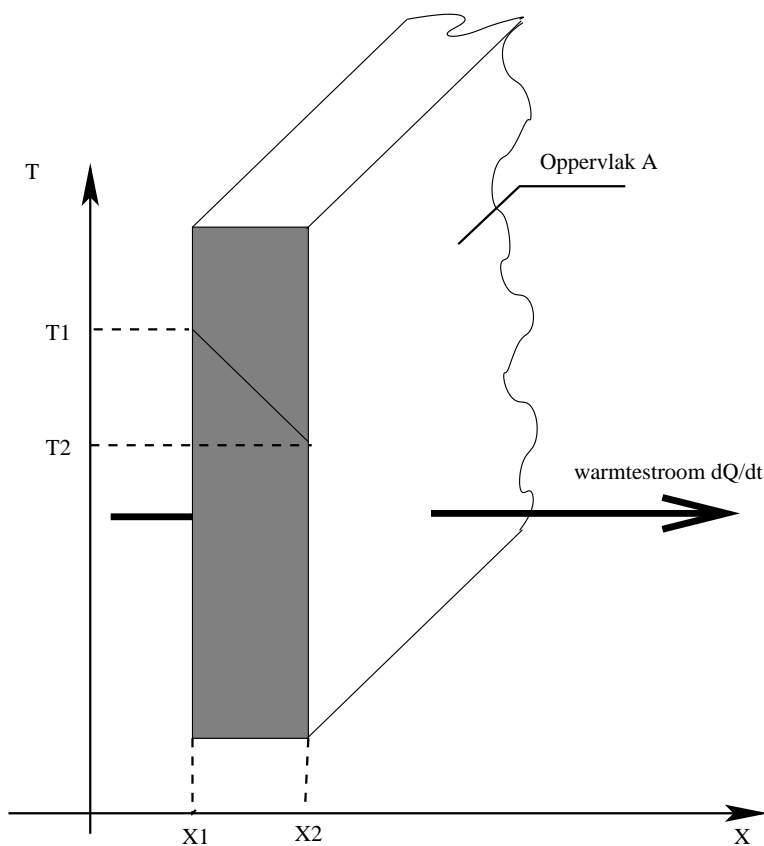
Figuur 5.1: De diverse warmtetransporten.

De uitdrukking \dot{Q} is eigenlijk de hoeveelheid warmte gedeeld door de tijd, je kunt het vergelijken met snelheid van een rijdende fiets. De eenheid van \dot{Q} is watts of Joule per seconde. Het is ook van belang om je te realiseren dat het warmte transport altijd loodrecht staat op het oppervlak.

Als we nu een evenredigheidsfactor invoeren kunnen we formule 5.3 herschrijven tot de wet van Fourier.

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (5.4)$$

De factor k wordt de warmte geleidings coëfficiënt genoemd. Als je de \dot{Q} nog door het oppervlak deelt dan krijg je de zogenaamde warmte flux.



Figuur 5.2: De warmtestroom door een wand.

- **Opdracht** Bepaal het warmte transport in Watts door een plaat koper van $0,12 \text{ M}^2$ met een dikte van 4 mm en een warmte geleidings coëfficiënt van: $390 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ De temperatuur aan de warme zijde is 100 graden en aan koude kant 10 graden celsius. Let wel op de volgorde in de formules.

Nu is het ook nog zo dat het warmte transport niet zomaar ophoudt op het scheidings vlak van de plaat en zijn omgeving. Het is logisch dat de warmte wordt afgegeven aan de omgeving. Dus de \dot{Q} moet worden opgedeeld over de warmte afvoer die via straling en die via convectie plaats vindt.

5.2.2 Convection

Convection is het mechanisme dat warmte wordt afgegeven aan een vloeistof of gas. Als kind heeft u waarschijnlijk al geleerd dat je de soep niet zo heet moet eten als zij wordt opgediend. Dus het blazen werd al snel ontdekt om soep of andere warme dingen af te koelen. Een soort gelijk iets is wind, als het vriest kan de gevoelstemperatuur wel -30 zijn terwijl het maar 15 graden onder nul is, of in de tropen als er een windje staat voelt het al gauw wat koeler. In de elektronica wordt hiervan natuurlijk gebruik gemaakt door het toepassen van een ventilator, kijk maar eens achter op uw PC.

Voor het gemak gaan we er van uit dat de vloeistof of het gas zich niet turbulent gedraagt maar netjes laminair stroomt. Dus op de wand waar de vloeistof langs stroomt hebben we een temperatuur die aangegeven wordt met T_w .

$$\dot{Q} \propto A(T_w - T_\infty) \quad (5.5)$$

En analoog aan het geleidings verhaal komt hier ook weer een factor om de hoek kijken die we warmte overdrachts coëfficiënt h noemen. En de man van de appels, Newton, heeft dit gevonden. Deze formule wordt dan ook Newtons koelwet genoemd.

$$\dot{Q} = h \cdot A(T_w - T_\infty) \quad (5.6)$$

Met h in W/m^2K . Het is soms handig om de temperaturen om te draaien om de warmte stroom positief te houden. Dus komt er uit uw berekening een negatieve warmte stroom dan even de temperaturen van plaats wisselen.

5.2.3 Warmte straling

De warmte straling bevindt zich in het infrarode gebied. In tegenstelling tot convection en geleiding is hier geen medium nodig om de warmte stroom te laten stromen. Alle lichamen die een temperatuur hebben boven het absolute nul punt stralen warmte uit. Een object bevindt zich in vacuüm en heeft temperatuur T_1 . De omgeving heeft temperatuur T_2 met die verstande dat $T_1 > T_2$.

Om e.e.a. te begrijpen is er een hypothetisch ding nodig, het zwarte lichaam (black body). Het zwarte lichaam is de ideale straler van thermische energy. Een echt voorwerp straalt altijd minder dan de ideale straler, het zwarte lichaam.

Hiervoor is een evenredigheids factor ingevoerd. De emissie coëfficiënt ε niet te verwarren met de permitiviteit die bijna het zelfde symbool heeft. Deze coëfficiënt heeft een waarde tussen nul en één. Een natuurconstante speelt ook nog een rol namelijk de constante van Stefan-Boltzmann. Deze wordt aangegeven door σ en moet dan ook niet verward worden met de soortelijke geleiding uit hoofdstuk 2. Deze constante is groot: $\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ En wederom is het oppervlak van belang.

$$\dot{Q} = A\sigma\varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (5.7)$$

We hebben nu alle drie de systemen van warmte transport beschreven. Nu kunnen we dan eindelijk wat praktisch er mee gaan doen. Alles samennemend kun je opmerken dat bij een koelplaat een combinatie van geleiding straling en convectie plaats vind.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (5.8)$$

De formule 5.8 geeft dus de totale warmte stroom.

5.2.4 Voorbeeld.

Gegeven:

Een cylinder vormige transistor met een diameter en een hoogte van 1,2 cm. De omgevings temperatuur is 25 graden celcius. Deze transistor is vast gesoldeerd op een PCB die een temperatuur heeft van 35 graden. De transistor heeft drie aansluitdraden van getrokken koper draad die 6 mm lang zijn en een doorsnede van 0,8118 mm (20 gage wire is amerikaanse standaard) heeft. De luchtstroom over en langs het component heeft een warmte overdracht coëfficiënt van $30 W/m^2 \cdot K$ Ga er van uit dat het component over al de zelfde temperatuur heeft en dat het 1,25 watt dissipeert. En verwaarloos de straling.

Oplossing:

De warmte afvoer gaat via twee mechanismen, enerzijds via convectie naar de lucht, anderzijds via geleiding van de aansluit draden.

We kunnen nu een afgeleide vorm van de formule 5.8 gebruiken en schrijven

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} \quad (5.9)$$

Waarin cond, conducted en conv, convected is. Als we nu de juiste formules er bij pakken dan kunnen we schrijven

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{conv} &= h \cdot A (T_w - T_\infty) && \text{voor de afgifte aan lucht} \\ \dot{Q}_{cond} &= k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} && \text{voor de draden} \end{aligned}$$

In tabellen boek zoals het polytechnisch zakboekje kan de warmte geleiding worden opgezocht van de koperen aansluit draden. Deze is 287 W/mK. Bepaal nu eerst de oppervlakte van het huis van de transistor. Boven en onderkant hebben het zelfde oppervlak (verwaarloos even de draden in de onderkant) en de cylinder wand.

$$\begin{aligned} A_c &= \pi \cdot D \cdot L + 2 \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \\ &= \pi \cdot 0.0012 \cdot 0.0012 + \frac{2 \cdot \pi (0.0012)^2}{4} \\ &= 6.79 \cdot 10^{-4} m^2 \end{aligned}$$

De meeste transistoren hebben drie aansluitdraden, dus het oppervlak van de draden moet bij elkaar worden opgeteld.

$$\begin{aligned} A_l &= 3 \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \\ &= 3 \left(\frac{\pi (8.118 \times 10^{-4})^2}{4} \right) \\ &= 1.55 \cdot 10^{-6} m^2 \end{aligned}$$

Als we nu de resultaten invullen in de formule voor \dot{Q} dan krijgen we.

$$\dot{Q} = hA_c(T_c - T_\infty) + \frac{kA_l(T_c - T_{pcb})}{l}$$

Deze uitschrijven en oplossen voor T_c dan krijg je:

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{\dot{Q} + hA_c T_\infty + \frac{kA_l T_{pcb}}{l}}{hA_c + \frac{kA_l}{l}} \\ &= \frac{1.25 + (30)(6.79 \times 10^{-4})(25) + 287(1.55 \times 10^{-6})(35)/(0.006)}{(30)(6.79 \times 10^{-4})(25) + 287(1.55 \times 10^{-6})/(0.006)} \\ &= 46.1^\circ C \end{aligned}$$

Nu we de temperatuur van de behuizing weten kun je uitrekenen hoeveel er via de lucht en via de aansluitdraden wordt afgevoerd. Na invulling in de formules

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cond} &= 0,821W \\ \dot{Q}_{conv} &= 0,429W \end{aligned}$$

Als we de straling hadden mee genomen zou de behuizings temperatuur nog lager zijn geweest.

Opdracht: Doe de som uit het voorbeeld nogmaals maar nu met de straling er bij.

Het is belangrijk om te zien hoe weinig de bijdrage is van de afkoeling door de lucht. Het is dus makkelijk te zien dat we hier iets aan moeten doen. Er zijn natuurlijk diverse methoden te bedenken om iets te doen aan de warmte afgifte. Oppervlakte vergroting is er één van.

5.3 Thermische weerstand.

Als we de wet van Fourier nu eens nader beschouwen:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (5.10)$$

Of na simpel herschrijven:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta X}{k \cdot A}} \quad (5.11)$$

Als we nu eens formule 5.11 naast de wet van Ohm zetten.

$$I = \frac{U}{R} \quad (5.12)$$

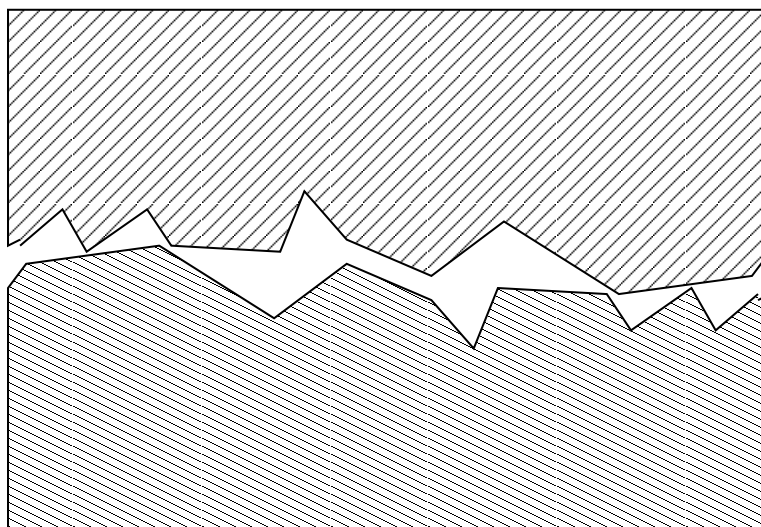
En nu poneren dat er zoiets bestaat als thermische weerstand, dan kunnen we schrijven dat:

$$R_{th} = \frac{\Delta X}{k \cdot A} \quad (5.13)$$

Stroom stroomt door een elektrische weerstand, en dit wordt veroorzaakt door het spannings verschil over die weerstand. Analoog stroomt warmte door een thermische weerstand en wordt veroorzaakt door het temperatuur verschil. De wetmatigheden van de serie en parallele weerstanden gaan hier ook op. Als je twee platen van verschillend materiaal tegen elkaar plakt dan moet je de thermische weerstanden bij elkaar optellen. Zet je ze nu naast elkaar dan moet je ze beschouwen als parallele weerstanden. We gaan hier wel uit van een stabiele toestand in één dimensie. Anders wordt de wiskunde te complex voor de fase van studie. Voor het zelf berekenen en ontwerpen van koelplaten wordt verwezen naar [4, hst3]. De student wordt wel geacht vanuit datasheets een koelplaat te kunnen selecteren.

5.4 Praktische koeling

Na de inleidende theorie is het nu tijd om naar de praktijk te kijken. In het figuur 5.3 wordt de overgang weer gegeven tussen twee materialen. De lege ruimtes tussen de vlakken zorgen er voor dat de thermische weerstand van dat systeem groot is. Dus het warmte transport vindt onnodige hinder. Nu is het logisch om die ruimtes te gaan opvullen met een materiaal.



Figuur 5.3: De overgang tussen twee materialen.

Hiervoor werd vroeger nog wel eens lood gebruikt maar dat mag niet meer. Een ander middel wat hiervoor gebruikt wordt zijn thermische pasta's. Vaak zijn deze silconen gebaseerd en wit van kleur. Zelden kom je Berylium pasta's tegen echter als je het niet zeker weet dan moet je er van uit gaan dat het berylium is en dit met de nodige voorzichtigheid behandelen, dus operatie handschoenen of vingercondooms² gebruiken.

Er wordt de laatste 10 jaar ook veel ontwikkeling gedaan op het gebied van thermische interface materialen. Een van deze bedrijven is Bergquist³.

Concluderend is het goed om er voor te zorgen dat het contact oppervlak goed geleid.

²Te koop in een goede medische toko

³<http://www.bergquistcompany.com>

5.4.1 Een voorbeeld.

Gegeven een transistor in een TO220 behuizing, type MJE3055T. Uit de datasheet blijkt dat deze een thermische weerstand heeft van junction naar case van $R_{thj-case} 1.66^\circ C/W$. In deze transistor wordt 30 Watt gedissipeerd en de junction temperatuur mag maximaal $150^\circ C$ zijn. En de maximale dissipatie wordt gegeven als 75 Watt bij een omgevings temperatuur van 25 graden Celcius. Uit veiligheids overwegingen moeten we de junction temperatuur minstens 20 graden onder de maximale waarde houden. Houdt er ook rekening mee dat je de omgevings temperatuur met een graad of 10 ophoogt omdat de transistor zijn omgeving opwarmt. Welke thermische weerstanden zijn er: Die van case naar junction en die staat in de transistor datasheet. Die van Case naar heatsink (koelplaat) en die van koelplaat naar omgeving. Uit literatuur blijkt dat een TO220 behuizing gemonteerd met koelpasta een thermische weerstand heeft van 0,005 tot 0,1. graden Celsius per Watt. In formule vorm:

$$T_j = T_{amb} + (R_{thj-case} + R_{thc-hs} + R_{thhs-amb})P_{diss}. \quad (5.14)$$

Als we dit even omschrijven dan krijgen we het volgende:

$$R_{th-heatsink} = \frac{T_{junc} - T_{amb}}{P_{diss}} - (R_{thj-c} + R_{thc-hs}) \quad (5.15)$$

Als we dit dus invullen dan krijgen we het volgende:

$$R_{th-hs} = \frac{130 - 35}{30} - (1.66 + 0.02) = 1.48K/W$$

We houden dat een thermische weerstand over van 1,48 graden Celsius/Watt voor de koelplaat. Deze is erg laag en de meeste koelplaten komen niet onder de 3 uit. Dit betekent dat we dus of geforceerd moeten koelen of een andere oplossing moeten bedenken. **Opdracht:**

Voer de zelfde berekening uit voor deze transistor als hij slechts 5 watt dissipeert en bepaal daarna de Junction temperatuur.

Hoofdstuk 6

Inleiding EMC

6.1 Elektromagnetische velden een inleiding.

De hedendaagse maatschappij kan niet zonder elektronica en elektrische systemen. Dit niet zonder kunnen komt al vrij snel tot uiting als de stroom uitvalt, dan zit je zonder PC Tv Koelkast etc m.u.v batterij gevoede apparaten.

Het gebruik van draadloze systemen neemt ook hand over hand toe, een voorbeeld hiervan is dat de bevolking massaal overstapt op persoonlijke communicatie systemen zoals GSM toestellen. Kortom, de moderne mens is min of meer afhankelijk van zijn elektronische systemen. Zo staan de RFID systemen in de aandacht van grote winkelketens, vee wordt al gevoerd op basis van hun RFID, bromfietsen, automobielen etc worden beveiligd. Dit soort-systemen maakt gebruik elektromagnetische velden.

Deze elektromagnetische velden kunnen, in het algemeen, systemen beïnvloeden. Zo was er bijvoorbeeld de ramp op de USS Forrestal in 1967. Dit vliegdekschip was op dat moment in de Vietnam oorlog betrokken en er vielen 134 doden door slecht elektronisch ontwerp. Wat was nu het geval een volledig bewapende straaljager die klaar stond. Van één van de geleide wapens was een inspectieluikje niet goed dicht geschroeft. Aan de overkant van het dek stond een F4b straaljager en een monteur schakelede perongeluk de boordradar in. Met als gevolg dat de raket werd afgevuurd en die veroorzaakte diverse explosies en brand.

Een ander wat minder schokkend verhaal zijn de problemen met de eerste Citroën met elektronische ontsteking. Door de sterke zenders van Lopik (lang

de A2) moest je al bij Jutphaas (nu Nieuwegein) 180 km/h gaan rijden en te hoogte van de zendmast viel de motor stil en kon je met de koppeling in buiten 'bereik' rollen waarna de motor gestart kon worden. Al dit soort zaken getuigen van een matig ontwerp m.b.t. EM velden.

Ook de huidige uitrol van C2000 wordt geplaagd door EM-veld problemen, de gebruikte communicatie apparatuur is niet compatibel met de apparatuur in de ziekenwagens en trauma helicopters.

Een recent geval van biologische effecten op de mens van EM velden zijn deukdijen[5]. In het algemeen wordt er gesproken over velden in plaats van straling. Dit omdat straling een negatieve bijklank heeft. Em velden die wel biologische schade kunnen aanbrengen beginnen bij het infrarode gebied. Overlopend in zichtbaar licht UV en röntgen en daarna de γ straling. α en β straling zijn deeltjes en blijven dus buiten beschouwing.

6.2 Elektromagnetische compatibiliteit.

Een ieder kent wel het verschijnsel van het geratel van een GSM toestel in de speakers van de PC. De speakers, geluidskaart en/of combinaties daarvan heeft klaarblijkelijk last van de GSM signalen die het toestel uitzend richting netwerk. De twee genoemde systemen zijn dus niet compatible. Wat is nu Elektromagnetische Compatibiliteit, EMC? Volgens de definitie [6, pag. 16] *EMC is het vermogen van een device, apparaat of systeem om in zijn elektromagnetisch milieu bevredigend te kunnen functioneren, zonder zelf ontoelaatbare stoorsignalen aan dat milieu toe te voegen.*

En drank komt uit een fles [7, pag 12]

BijlageA

natuurconstanten

| Constante | Symbool | waarde | eenheid |
|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
| Lichtsnelheid in vacuüm | c_0 | $299,792458 \cdot 10^6$ | m/s |

Bibliografie

- [1] Allan R. Hambley. *Electronics*. Prentice Hall, second edition, 2000.
- [2] Felix Zandman e.a. *Resistor theory and technology*. Vishay intertechnology, inc, 2001.
- [3] Peter Vizmuller. *RF Design Guide*. Artech House, 1995.
- [4] Kirk D. Hagen. *Heat Transfer with Applications*. Prentice Hall, 2000.
- [5] <http://home.hccnet.nl/b.elzerman/Deukdij.html>.
- [6] dr. J.J. Goedbloed. *Elektromagnetische compatibiliteit*. Ten Hagen Stam uitgevers., herziene edition, 2000.
- [7] dr. V. Prasad Kodali. *Engineering Electromagnetic compatability*. IEEE press, second edition, 2001.