

De planning van het ruisonderzoek

Hooge, F.N.

Gepubliceerd: 01/01/1996

Document Version

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the author's version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

De planning van het ruisonderzoek

Afscheidscollege

Prof.dr.dr.h.c. F.N. Hooge



Afscheidscollege

Gegeven op 8 maart 1996

aan de

Technische Universiteit Eindhoven

Prof.dr.dr.h.c. F.N. Hooge

Mijnheer de Rector Magnificus,
Dames en heren,

Aan het begin van mijn voordracht wil ik U vragen even naar een bandje te luisteren.

*5 seconden zuiver 1/f ruis
Frequentiebereik: 10 - 10⁴ Hz
Sterkte: hinderlijk maar niet pijnlijk*

Wat was Uw eerste reactie ? De wetenschappelijk begaafden onder U zullen zich hebben afgevraagd "Wat is dat ?" De reactie van de meesten zal zijn "Kan dit weg ?" Dit laatste is de maatschappelijk relevante vraag, die echter pas beantwoord kan worden als de eerste, wetenschappelijke vraag beantwoord is.

Natuurlijk, hier in de zaal hoeven we maar een knop om te draaien. Maar U begrijpt dat het echte probleem is, dat als we elektrische componenten niet uiterst zorgvuldig maken, zij ongewenste en hinderlijke ruis zullen produceren, die we na de fabricage niet alsnog kunnen elimineren of compenseren. Uw vraag, kan dit weg, kan pas beantwoord worden als we weten welke maatregelen we bij de fabricage zouden moeten nemen. Maar daarvoor moeten we dan weer weten wat de ruis veroorzaakt.

Ruis is een onregelmatigheid in de stroom van de elektronen door het kristalrooster. De vraag is: Wat doen de elektronen als ze ruis genereren ? Botsen ze tegen elkaar ? Botsen ze tegen defecten in het vrijwel perfecte kristal ? Voor we ooit aan ons technisch relevante probleem kunnen werken moeten we eerst dit soort fundamentele vragen oplossen. Sommige onderzoekers zullen meteen - zonder enige technologische vraagstelling - aan het fundamentele probleem beginnen. Hun onderzoek noemen we dan curiosity driven research. De intenties van zulke onderzoekers zijn niet zo sociaal, maar wat maakt dat uit ? Gedreven, of door industriële interesse, of door pure nieuwsgierigheid wordt hetzelfde werk verricht.

Onafhankelijk van Uw eerste reactie komen we allen voor de vraag: Wat is het ? Het antwoord luidt: Dit was nou 1/f ruis. Eigenlijk is dat geen echt antwoord op de vraag. Wat het is, kan na een halve eeuw jaar onderzoek nog niet beantwoord worden in termen van wat de elektronen doen als zij 1/f ruis genereren. Wel kunnen we het onbegrepen verschijnsel een naam geven. De f staat hier voor frequentie. De intensiteit van de lage tonen is sterker dan van de hoge tonen. De intensiteit is precies omgekeerd evenredig met de frequentie, vandaar de naam 1/f ruis. Het is dit verschijnsel, 1/f ruis, dat 25 jaar lang onderwerp van

onderzoek van onze vakgroep is geweest. We proberen te begrijpen wat het is, om daarna deze hinderlijke ruis te kunnen elimineren.

Ik wil hierbij terugblikken op de planning van dit ruisonderzoek. We zullen bekijken hoe de planningsprocessen zich ontwikkelden. Ik zal U geen gedetailleerd verslag doen van resultaten en vondsten, maar wel vertellen hoe we tot de keuze kwamen van de achtereenvolgende stappen in het onderzoek. Daarna bespreek ik organisatorische aspecten van deze planning, waartoe ook de wisselwerking met onze omgeving behoort.

Onderzoek vereist een goede planning. Om een beeldspraak te gebruiken: we bereiden ons voor op een jacht. We zijn realistisch, we kennen onze beperkingen en stellen dus ons doel niet te hoog: We gaan op de konijnenjacht. Dankzij de serieuze voorbereiding zijn we voorzien van de juiste munitie en vergunningen, van de juiste kleding en instructies en wat dies meer zij. We hebben ook al een prachtig tableau van jachttrofeën, althans taakstellend. En zo zijn we dan op de konijnenjacht. Plotseling komt er een eenhoorn voorbij. Wat moeten we doen? Beide antwoorden zijn goed.

Maar hoe verloopt zo een jacht in werkelijkheid? Als case study nemen we ons ruisonderzoek. Vanaf 1966 heb ik me met 1/f ruis bezig

gehouden, eerst op het Natuurkundig Laboratorium van Philips, vanaf 1971 op de Faculteit Elektrotechniek.

Wat wisten we eind zestiger jaren van de 1/f ruis? Eigenlijk stond alleen vast dat 1/f ruis bestaat. Mocht het bestaan dan al geaccepteerd zijn, over de oorzaak was er grote onenigheid. In het boek *Instrumentele Elektronica* van G. Klein en J.J. Zaalberg van Zelst uit 1966 lezen we: "Over de oorsprong van deze extra ruis bestaat een groot aantal theorieën en betrekkelijk weinig klaarheid". Dat was een voortreffelijke samenvatting in 1966 (trouwens ook in 1996).

Maar in 1966 was er toch één theorie komen bovendrijven. McWhorter's model gebaseerd op trapping aan het oppervlak. In dit model stellen we ons voor dat de vrije elektronen uit het binnenste van de halfgeleider ingevangen kunnen worden in speciale toestanden, de zogenaamde traps, die altijd aanwezig zijn in de oxidehuid op het halfgeleider oppervlak. Elektronen die in de traps ingevangen zijn, kunnen niet meer meedoen aan de elektrische geleiding. Gemiddeld zit een bepaalde fractie van de elektronen in de traps. Maar voortdurend vliegen er elektronen de traps in en uit. Gemiddeld gaan er evenveel in als uit. Maar deze twee processen zijn niet ieder moment precies aan elkaar gelijk. Daardoor fluctueert

ook het aantal elektronen in de traps van moment tot moment, en bijgevolg ook het aantal vrije elektronen, met hun bijdragen in de stroomgeleiding. Door een virtueuze keuze van de details van het model kon McWhorter zeer trage trappingsprocessen verklaren, waarvan het ruisspectrum netjes $1/f$ was.

Hiermee had McWhorter een chemische oplossing aangedragen voor het elektrotechnische probleem van de $1/f$ ruis: Voorkom of verwijder de traps, en de $1/f$ ruis zal niet optreden. Maar daarvoor moeten we weten waar die traps uit bestaan. We zoeken de chemische identificatie van de elektrisch actieve traps. Daarom werd er in 1966 bij Philips een chemicus aan het $1/f$ ruis probleem gezet.

Ik heb scheikunde gestudeerd, en ben bij Ketelaar in Amsterdam gepromoveerd op een infrarood spectroscopisch onderwerp. Ik heb daar veel geleerd, niet alleen allerlei spectroscopische wetenswaardigheden, maar vooral een stijl van onderzoek doen. Na mijn promotie kwam ik op het Philips Nat. Lab. waar ik mijn kennis van spectroscopische technieken toepaste op fluorescentie. Daardoor leerde ik vanzelf wat vaste-stof fysica. Wie fluorescentie begrijpt, begrijpt ook halfgeleiders. Zo raakte ik meer en meer los van de scheikunde. Nadat ik een jaar op het Philipslaboratorium in Redhill had gewerkt was er

bij terugkeer in Eindhoven een natuurlijk moment van bezinning over hoe nu verder. De directie vond dat ik toch beter naar iets chemisch terug kon gaan; het was anders zonde van de investeringen van mijn chemische opleiding. Nu lag er toevallig een chemisch probleem: $1/f$ ruis, waarbij wat kennis van halfgeleiders wellicht toch ook nog nuttig was. Ik zag de redelijkheid van dit voorstel volkomen in, en begon in alle eerblijvheid aan een echt chemisch onderzoek: de identificatie van de traps die de $1/f$ ruis veroorzaakten.

Ik begon met te lezen wat er over $1/f$ ruis gepubliceerd was. Dat was heel veel en het was uiterst verwarrend. Iedere theoreticus citeerde zijn eigen selectie van favoriete experimentele onderzoeken. Bij ieder experimenteel resultaat paste een aantal theorieën, bij iedere theorie paste een aantal experimenten. Niet geleid door enige theorie heb ik alle gepubliceerde meetresultaten verzameld. Onderlinge vergelijking was moeilijk. De resultaten waren gemeten aan verschillende materialen, aan preparaten met verschillende afmetingen, en dus met relatief veel of weinig oppervlak. De invloed van contacten was vaak onduidelijk, en dat terwijl contacten berucht zijn om hun $1/f$ ruis.

Het bleek handig te zijn als de ruis uitgedrukt werd in een grootheid α die gedefinieerd is door de volgende relatie

$$\frac{S_R}{R^2} = \frac{\alpha}{fN}$$

S_R is de spectrale ruisdichtheid van de fluctuaties in de weerstand R . Links staat dus de relatieve ruis. Rechts staat f in de noemer want we hebben het over $1/f$ ruis. Verder staat er N , het totale aantal elektronen. Dat is een triviale factor: hoe meer elektronen, hoe beter de relatieve ruis uitmiddelt. De factor $1/N$ is het enige stukje fysica in de formule. We weten helemaal niet wat de elektronen doen als ze $1/f$ ruis produceren. Het enige dat we hier aannemen is: wat de elektronen ook mogen doen, dat doen ze onafhankelijk van elkaar. Zo gekozen, is α een maat voor de relatieve ruis per elektron. De grootheid α is handig om een overzicht te maken over ongelijksoortige preparaten die onder verschillende omstandigheden gemeten zijn. Het wonder was nu, dat α min of meer constant bleek te zijn. Daarmee werd de relatie, die α definieert, een empirische relatie met α die ongeveer gelijk aan 10^{-4} bleek te zijn.

Hiermee was volstrekt niet bewezen dat deze empirische relatie correct is. Er waren te veel meetresultaten die een factor 100 of zo te groot of te klein waren. Maar de algemene indruk was veelbelovend, vooral omdat het aantal elektronen N sterk varieerde van 10^9 tot 10^{14} . In ieder geval was dit overzicht een basis

voor het opzetten van reeksen van systematische metingen aan goed gedefinieerde preparaten. Vanaf 1970 zijn er veel metingen verricht - niet alleen in Eindhoven - aan goed homogene preparaten, die zo ontworpen waren, dat ruis van de kontakten geen invloed op de metingen had. De conclusies uit dat onderzoek zijn: 1. $1/f$ Ruis is een systematisch effect, open voor wetenschappelijk onderzoek. 2. De weerstand fluctueert met een $1/f$ spectrum. Wat we nog niet weten is, waarom fluctueert de weerstand en waarom met $1/f$.

Wat we wel weten is dat we onze ideeën rond het McWhorter model grondig moeten herzien. De empirische relatie beschrijft de $1/f$ ruis in homogene preparaten. In die formule staat niets over de verhouding oppervlak tot volume. Een kubus of een platte schijf of een dunne draad met evenveel elektronen N geeft evenveel ruis. Dus is $1/f$ ruis geen oppervlakte effect; maar een bulk-effect.

Verder maakt de factor $1/N$ duidelijk, dat als metalen ook $1/f$ ruis zouden hebben, we alleen voldoende grote ruis kunnen meten aan zeer kleine preparaten. Zulke kleine preparaten zijn eenvoudig te maken: druk een fijne metaalpunt op een plaat. Het puntcontact voldoet aan onze eisen. Zo zijn van veel puntkontakten α waarden bepaald door Vandamme. Ook gecompliceerde

kontaktstructuren konden op grond van de empirische relatie geanalyseerd worden. Algemene conclusie: Metalen ruisen net zo hard als halfgeleiders: $\alpha_{\text{metaal}} = \alpha_{\text{halfgeleider}}$. De beruchte kontaktruis is niet iets eigenaardigs, maar het is gewone 1/f ruis, whatever that may be.

Metalen hebben zeer grote hoeveelheden vrije elektronen. Als er een paar in traps ingevangen worden, zal dat nauwelijks merkbaar zijn in de geleiding. Dus zullen fluctuaties in de trapping onmeetbaar zijn. Waar metalen net zo hard ruisen als halfgeleiders moet over die trapping ook maar eens goed nagedacht worden.

McWhorters model vatte goed samen wat iedereen op dat moment op grond van experimenten wist. Vast stond toen dat 1/f ruis ontstaat a in halfgeleiders b door trapping c aan het oppervlak. Alle drie de punten worden weersproken door de empirische relatie. Geen wonder, dat die relatie in latere overzicht-artikelen - die niet door ons geschreven zijn - gekarakteriseerd werd als revolutionair en baanbrekend. Zelfs het woord iconoclastisch is gebruikt. Niet gek voor het werk van een oudleerling van een jezuïtencollege.

Hiermee is nu wel de hoop verdwenen, dat we door etsen van het oppervlak de traps kunnen verwijderen. Er is dus geen chemische remedie tegen 1/f ruis. Het is een

bulkeffect dat ook optreedt in zeer schone, perfecte halfgeleiders. Het elektrotechnische probleem van de 1/f ruis lijkt geen chemische oplossing te hebben, maar misschien wel een fysische.

Kort voor het Eindhovense halfgeleideronderzoek begon, was er in Leiden 1/f ruis gevonden in zenuwmembranen. Een groep met o.a. Verveen en van de Berg op het Fysiologisch Laboratorium onderzocht de ruis in de potentiaalsprong over een knoop van Ranvier. Fig. 1 toont een zenuwcel met een lange uitloper, axon genaamd. Een axon kan decimeters lang zijn. In de elektrisch isolerende wand van de axon zitten hier en daar knopen van Ranvier waardoorheen transport van ionen mogelijk is. De ionenconcentraties binnen en buiten de axon zijn verschillend en daardoor staat er een potentiaalsprong over het membraan in de knoop van Ranvier, dit is een concentratiecel. Het interessante is dat de potentiaal sprong niet constant is maar fluctueert met een 1/f spectrum; een heel fraai 1/f spectrum over een breed frequentiegebied.

De fysiologen hadden de ruis ontdekt in een potentiaalsprong. Met wat we toen wisten van de ruis in halfgeleiders lag de vraag voor de hand: fluctueert het geleidingsvermogen van ionogene oplossingen soms ook? Het experimenteel gevonden antwoord is ja. En nu komt

het echt gekke. De relatieve ruis in het geleidingsvermogen was net zo groot als de relatieve ruis in de potentiaalsprong. Wat is daar dan zo gek aan? Zonder er over na te denken had iedereen altijd aangenomen dat het geleidingsvermogen fluctueert omdat het aantal elektronen of ionen fluctueert. $x\%$ fluctuatie in het aantal geeft $x\%$ fluctuatie in het geleidingsvermo-

gen. Maar in de formules voor de potentiaalsprong van concentratiecellen staat het aantal ionen in een logaritmische term. Een fluctuatie van $x\%$ in het aantal is nauwelijks merkbaar in die logaritmische term, en dus ook nauwelijks meetbaar in de potentiaalsprong. De enige uitweg is, dat we aannemen dat niet het aantal fluctueert maar wel de beweeglijkheid van de ionen of elektronen.

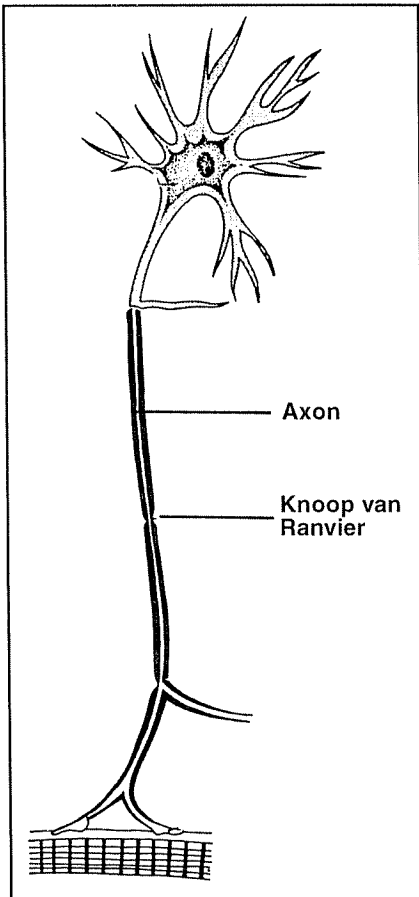


Fig 1 Zenuwcel

De beweeglijkheid beschrijft de snelheid die geladen deeltjes krijgen in een elektrisch veld. De versnelling door het veld gaat niet voortdurend door, want vroeg of laat botst het deeltje ergens tegenaan en is het zijn snelheid kwijt. De botsingen bepalen de maximale snelheid, die het deeltje door het veld krijgt. Hoe minder botsingen des te groter de beweeglijkheid. Hoe meer botsingen des te kleiner de beweeglijkheid, de resulterende snelheid en dus de stroom. Kennelijk fluctueert het aantal botsingen in een gegeven tijdsinterval langzaam met een $1/f$ spectrum.

Voordat we proberen ons daar iets bij voor te stellen, moeten we ons toch even bezinnen op de logica van de bewijsvoering. Er is nu bewezen dat in ionogene oplossingen de $1/f$ ruis in de beweeglijkheid zit. Als we zouden mogen aannemen dat het mechanisme van de $1/f$ ruis in de geleiding hetzelfde is in ionogene oplossingen en in halfgelei-

ders, dan moet de ruis in halfgeleiders ook een beweeglijkheidsfluctuatie zijn. Maar voor de elektrische geleiding mogen we ionen eenvoudig beschouwen als grote bollen die zich volkomen klassiek gedragen volgens 19^e eeuwse fysika. De elektronen daarentegen moeten beschreven worden met formules uit de quantummechanica. De ruis in de potentiaalsprong over de knoop van Ranvier bewijst niets voor elektronen in halfgeleiders. Maar het inspireert wel tot een halfgeleider experiment waardoor beslist kan worden of er in halfgeleiders sprake is van fluctuaties in het aantal of beweeglijkheidsfluctuaties.

Naar analogie van de concentratiecel moeten we de ruis onderzoeken van een halfgeleider effect waarbij het aantal elektronen in een ongevoelige term staat - b.v. een logaritmische term - en de beweeglijkheid eenvoudig in een evenredigheidsfactor. Fluctuaties van x % in de beweeglijkheid geven dan een fluctuatie van x % in het effect, terwijl x % fluctuatie in het aantal nauwelijks of niet meetbaar zal zijn in het effect. Kleinpenning heeft een reeks van fundamentele onderzoeken gedaan aan de ruis in een aantal halfgeleider effecten, o.a. in de thermospanning. Voor het bestuderen van de thermospanning leggen we een temperatuurverschil aan over een stukje halfgeleider. Dat temperatuurverschil roept een potentiaalverschil op tussen het

hete en het koude contact. In dit potentiaalverschil zit $1/f$ ruis, waarvan de grootte vergeleken wordt met de grootte van de $1/f$ ruis in de geleiding van hetzelfde materiaal. De interpretatie is moeilijk en ingewikkeld. Maar wie het volgen kan, ziet ondubbelzinnig dat van de elektronen de beweeglijkheid fluctueert en niet hun aantal. De metingen aan zenuwen en ionogene oplossingen hebben ons de weg gewezen naar halfgeleider experimenten waaruit volgde dat de $1/f$ ruis ook daar een fluctuatie in de beweeglijkheid is.

Voor een nadere bestudering van de ruis in de botsingstijden moeten we gedetailleerder kijken naar de botsingsprocessen. Elektronen die door het halfgeleiderkristal lopen kunnen tegen allerlei objecten botsen. Daar zijn de vreemde atomen die ingebouwd zijn in het kristalrooster. Als de elektronen gestrooid worden door deze onzuiverheden spreken we van onzuiverheidsstrooiing. Verder staan de eigen atomen van het kristalrooster niet volkomen stil op hun plaats. Ieder trilt rond zijn evenwichtspositie, maar omdat ze verend aan elkaar vastzitten ontstaan er golven die door het hele kristal heen lopen. De elektronen worden ook door deze golven gestrooid. Dit is de zogenaamde roosterstrooiing. De vraag is nu of we de ruis in de beweeglijkheid aan één bepaald strooiingsmechanisme toe moeten schrijven. Die vraag kunnen we beantwoorden

door van een halfgeleider een reeks preparaten te maken. In opeenvolgende preparaten laten we de beweeglijkheid afnemen door het toevoegen van steeds meer onzuiverheden, waardoor de botsingsmogelijkheden steeds meer toenemen. Het blijkt dan experimenteel dat de onzuiverheidsstrooiing ruisvrij is en dat alle $1/f$ ruis van de roosterstrooiing komt.

Fig. 2 toont recente meetresultaten van Xuyuan Chen aan InP. Verticaal is de gevonden waarde van α uitgezet, horizontaal staat de beweeglijkheid μ . De zuiverste preparaten staan rechts boven. Er is daar alleen roosterstrooiing, dus een hoge beweeglijkheid μ . Ook de ruisparameter α is hoog. Links onder staan de preparaten met veel onzuiverheden. Daardoor is hun beweeglijkheid

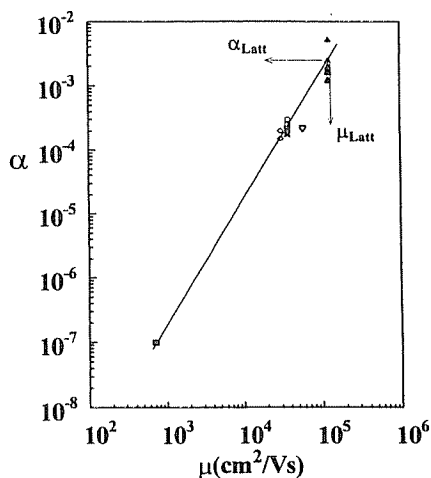


Fig. 2 Ruisparameter α als functie van de beweeglijkheid μ voor een reeks van InP preparaten bij een temperatuur van 77 K.

sterk verminderd. Maar het toegevoegde strooiingsmechanisme is ruisvrij. We hebben het ruis genereernde strooiingsmechanisme van de roostergolven verdund met ruisvrije onzuiverheidsstrooiing. De getrokken lijn is berekend uit de theorie die een quantitative formulering is van wat ik zojuist in woorden heb geschetst. Conclusie: alle $1/f$ ruis wordt gegeneerd door de roosterstrooiing. Als de ruis door onzuiverheidsstrooiing gegeneerd zou zijn geweest dan zouden de meetpunten langs een horizontale lijn gelegen hebben. Het achterliggende idee is simpel, alles valt en staat met de uitvoeringsmogelijkheden. We eisen een serie kristallen waarin van kristal tot kristal de onzuiverheidsconcentratie toeneemt, terwijl alle andere eigenschappen gelijk moeten blijven.

Toen ik over het overzicht van de literatuurgegevens sprak, waaruit de empirische relatie bleek, heb ik gezegd dat er preparaten waren waarvan de gemeten α waarde een factor 100 of meer afweek van de verwachte waarde. Het onderzoek waar we het nu over hebben eist voor preparaten van een bepaalde soort een reproduceerbaarheid binnen 10 %. Alleen dan kunnen de gemeten waarden zinvol vergeleken worden met de theoretische verwachting, voorgesteld door de getrokken lijn. Dat dit soort analyse van de samenhang van ruis en strooiing uitsluitend in Eindhoven

gedaan is, is te danken aan de uitzonderlijke groei- en preparatiemogelijkheden in de groep van collega Wolter op de Faculteit Technische Natuurkunde. In het bijzonder wil ik hier Dr. Leys bedanken. Maarten, je was een betrouwbaar leverancier van betrouwbare preparaten. Dames en Heren, dit klinkt nogal middenstanderig, maar degenen die iets weten van halfgeleider technologie beseffen dat ik hiermee mijn diepste respect tot uiting breng voor het werk van Maarten Leys.

We zijn gekomen bij het huidige onderzoek. De strooiingskans van roostertrillingen blijkt $1/f$ ruis te hebben. Dat betekent dat de energie in een roostertrilling langzaam fluctueert met een $1/f$ spectrum. Maar dan moet ook de strooiingskans voor andere deeltjes dan elektronen $1/f$ ruis hebben. Inderdaad heeft Musha in Tokyo recentelijk $1/f$ ruis gemeten in de intensiteit van laserlicht dat gestrooid is aan roostergolven in kwarts. Uit het experimentele werk is langzamerhand een consistent beeld ontstaan. Dat beeld roept echter grote theoretische problemen op, waarvoor de oplossing nog niet in zicht is.

Verder is er nog een verontrustend probleem. We begrijpen $1/f$ ruis in perfecte kristallen. Maar als we het kristalrooster beschadigen neemt de $1/f$ ruis drastisch toe. De beschadigingen, door straling of mechanische deformatie, zal wel extra

strooicentra introduceren. Inderdaad zien we de beweeglijkheid 10 % à 20 % afnemen, maar de ruis explodeert bijna met een factor 100 à 1000.

We zijn er nog niet helemaal uit. Maar met wat we nu wel weten is het mogelijk nuttige opmerkingen te maken inzake de fabricage van ruisarme elektronische devices. Alle halfgeleider materialen, ook de zuiverste en meest perfecte, hebben $1/f$ ruis. Er zijn geen ruiscentra die we kunnen vermijden of weghalen. Voor ruisarme devices moeten we voorkomen dat ergens de stroom door slechts weinig elektronen gedragen wordt. Hoe meer elektronen meedoen, des te beter is de uitmiddeling van de ruis. Dit is de consequentie van de factor $1/N$ in de empirische relatie. Eenzelfde stroom kan gedragen worden door weinig elektronen die snel lopen, of door veel elektronen die langzaam lopen. De laatste situatie is ruisarm.

Beschadigde roosters hebben veel $1/f$ ruis. Dit is totaal onbegrepen, maar het systematische verband kan goed gebruikt worden om de kwaliteit van devices en materialen te onderzoeken. Ruismetingen zijn eenvoudig, snel en hoogst gevoelig voor imperfecties. Vandamme heeft een reputatie opgebouwd met het onderwerp, Noise as a Diagnostic Tool.

Nu wij, althans een deel, van de

waarheid achterhaald hebben, kunnen we achteraf terugkijkend ons afvragen waardoor onze manier van planning zo succesvol was. Het verschil met de meeste andere onderzoekers is geweest dat wij ons niet op een enkele theorie hebben vastgelegd; niet op een door ons zelf ontwikkelde theorie en ook niet op een theorie, ontwikkeld door een van de grote theoretische meesters. De meeste onderzoekers kiezen één model. Zij rekenen dan de grootte van de ruis uit en kijken of die klopt met de resultaten van metingen. In onze manier van praten: uit het model rekent men een theoretische waarde van α uit, die met experimenteel gevonden α waarden vergeleken wordt.

Vergelijken met de literatuur zal hier altijd succesvol zijn; tenminste als men slechts op zoek is naar α waarden met de gewenste grootte. Er zijn inmiddels zeer veel meetresultaten gepubliceerd, betrouwbare en onbetrouwbare, gemeten aan goed omschreven en aan onduidelijke preparaten, met en zonder kontaktruis etc. De uit de literatuur te kiezen α waarden liggen tussen 10^{-8} en 1. Ieder theoretisch model kan zodoende bevestigd worden.

Als startpunt van onderzoek was voor ons ieder model acceptabel, als er maar experimenten bij bedacht konden worden die het model ondubbelzinnig bevestigden of ver-

wierpen. Ook een model dat onvolmaakt is, waartegen nog allerlei theoretische bedenkingen ingebracht kunnen worden, kan best bruikbaar zijn voor het ontwerpen van cruciale experimenten. Hiervan geef ik U twee voorbeelden:

1e. Toen we begonnen, wisten we nog niet of $1/f$ ruis in halfgeleiders en in ionogene oplossingen iets met elkaar te maken hadden. Wat moeten we dan met de ruis in zenuwen die op beweeglijkheidsfluctuaties leek te wijzen? Toch gaf het de inspiratie tot de bestudering van ruis in thermospanning. Ruis in thermospanning is zeker geen technisch relevant probleem, maar wegens wiskundige analogieën vanwege de logaritmische termen, zou het voor halfgeleiders wel eens beslissende uitspraken kunnen doen over fluctuaties in aantal of in beweeglijkheid. Daarover hoeft niet heel lang en heel diep nagedacht te worden, te meer niet omdat de experimenten eenvoudig en goedkoop uitgevoerd kunnen worden.

2e. Toen eenmaal vaststond dat de beweeglijkheid fluctueerde hebben we niet alle, echt moeilijke quantum-mechanische strooiingsmodellen bestudeerd om te zien of er soms een was die een $1/f$ spectrum op zou kunnen leveren. Als de ruis in de roosterstrooiing zit, zal α kwadratisch met μ toenemen

voor een serie van preparaten met variërende onzuiverheidsstrooiing. Als de ruis in de onzuiverheidsstrooiing zit zal α in het geheel niet van μ afhangen. De vraag is dus niet of in figuur 2 de exponent $2 \pm 0,1$ is, maar of hij 2 of 0 is; m.a.w. of de gemeten waarden langs de getrokken lijn of langs een horizontale lijn liggen.

Dit waren twee cruciale beslissingen in het onderzoek. Bij beide hebben we ons door hetzelfde principe laten leiden: We moeten niet proberen te bedenken hoe het zou moeten zijn; we moeten kijken hoe het is. Denken is goed, kijken is beter.

We mogen dan voor onszelf tot het juiste inzicht gekomen zijn, het wordt pas echt relevant als de andere onderzoekers van de 1/f ruis dit inzicht delen of er stevig tegen ingaan. Welke rol spelen we in de internationale literatuur? Hoe reageren andere onderzoekers in hun publikaties op de onze? Vandaar de interesse in citaties. Het tellen van citaties is een omstrepen punt. Zeker op een Technische Universiteit is er veel werk dat niet leidt tot publikaties, maar tot functionerende apparaten, toestellen of systemen. De internationale uitwisseling loopt daar niet via de literatuur. Waar geen publikaties zijn, zullen er ook geen citaten volgen. Citatie analyse van zo een gebied zou tot geheel verkeerde conclusies

kunnen leiden. Ik wil best geloven dat meer dan de helft van het werk op een Technische Universiteit van deze soort is, die men eerder ontwerpen dan onderzoeken zou moeten noemen. Hoewel het ontbreken van citaties bij sommige groepen dus helemaal niet verontrustend is, gezien de aard van het werk, is dit geen reden om principieel nooit naar citaties te willen kijken, als die bij andere groepen wel aanwezig zijn. Ook op de T.U.'s zijn er gebieden, waarin men wel kan lezen en schrijven. Daar zijn citaties een goede maat voor kwaliteit en relevantie. Kort en goed: Geen citaten zegt niets, wel citaten bewijst relevantie.

In figuur 3 ziet U hoe vaak in een bepaald jaar de publikaties van de ruisgroep geciteerd zijn. Het zijn citaties naar publikaties, waarvan de eerste auteur uit de ruisgroep komt. De citaties zijn zoals opgegeven in

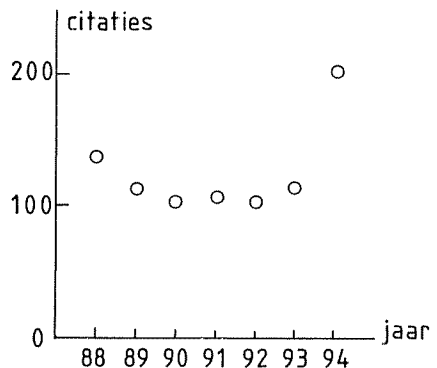


Fig. 3 Aantal citaties per jaar van publikaties waarvan de eerste auteur uit de ruisgroep komt.

de Science Citation Index. Het zijn er zo een 100 per jaar. Ik had in deze grafiek ook de citaties naar andere groepen van onze faculteit kunnen afbeelden. Maar dat zou voor veel van mijn collega's de sfeer kunnen verstoren. Tenslotte is dit een feestelijke dag. We realiseren ons vandaag dat we weer een stap dichterbij een betaalbare faculteit zijn gekomen; volgens sommigen zelfs een stap dichterbij een betere faculteit. Laat ik er daarom slechts het volgende van zeggen: Er is geen enkele groep, die meer citaten weet te ontlokken, ook de zeer grote niet, sterker: de zeer grote zeker niet. Honderd is meer dan alle andere groepen gezamenlijk bij elkaar krijgen; beduidend meer. Hoe het honderdtal zich verhoudt tot de opbrengst van de hele TUE weet ik niet. U zou mogen verwachten dat de Beleidsvoorbereiders in het Bestuursgebouw U op dit punt zouden kunnen informeren.

Het jaar 1994 springt er uit. Maar maakt U zich niet ongerust, dit is niet het begin van een take-off naar nog onrustbarender niveaus. Het jaar 1994 is slechts een incident. Het Amerikaanse Institute of Electrical and Electronic Engineers heeft toevallig in dat jaar een speciaal nummer uitgegeven, gewijd aan ruis in elektronische devices. Kennelijk vond de IEEE ruis een belangrijk onderwerp. Ik wijs er graag op dat het niet een of andere Physical Society, maar de IEEE was, die dit

ruisnummer organiseerde. Wij hebben aan dit nummer 4 invited papers bijgedragen. Vandamme twee, Kleinpenning en ik ieder een. Wie heden ten dage zo een ruisnummer wil samenstellen, ook al is het de IEEE zelf, moet even Eindhoven bellen. In onze overzichtsartikelen hebben we uiteraard ook naar ons eigen werk verwezen. Dit is een gedeeltelijke verklaring voor de incidenteel hoge opbrengst in 1994.

In de faculteit wordt vaak de vraag gesteld of het subkritische groepje dat aan ruis werkt wel voldoende mankracht heeft om de stormachtige ontwikkeling in het internationale onderzoek bij te kunnen houden. Het is terecht dat die vraag gesteld wordt in een tijd van reorganisatie, noodtoestand en staat van beleg. Welnu, kunnen wij de buitenwereld volgen? Figuur 3 geeft het antwoord: De buitenwereld volgt ons.

Onze manier van denken wordt door anderen op ruime schaal gevolgd bij het analyseren en ontwerpen van devices. Dat wil echter niet zeggen, dat we onze inzichten kunnen verzilveren. Bij dit soort verkennend onderzoek ontlenen we via de literatuur veel aan het werk van anderen, omgekeerd verspreiden wij onze inzichten via de open literatuur. In dit stadium van verkennend onderzoek is het in niemands belang om krampachtig te zoeken waar we de rekening kunnen deponeren. Het

afwegen van wat iemand krijgt en wat hij bijdraagt leidde in de middeleeuwse universiteiten tot het volgende principe: Inzicht is een gave Gods en als zodanig is het niet verhandelbaar. Zoals met zovele principes ging men ook met dit principe creatief om. Niettemin denk ik dat ik op dit punt dichterbij de middeleeuwse universiteit sta dan bij de ondernemende.

Dit college over de planning van ruisonderzoek handelde tot nu toe over de inhoudelijke planning. In het laatste deel wil ik meer aandacht besteden aan de planning van de organisatie van dat onderzoek.

In deze tijd van teruglopende studentenaantallen en daardoor krimpende budgetten en formaties heeft de faculteit grote zorgen over de voortgang van het onderzoek. Samenhang en samenwerking moeten bevorderd, en voor alles, versnippering moet bestreden worden. We zijn erin geslaagd krachtige leiders te vinden, die weten wat ze willen, en soms zelfs wat ze kunnen. Ik denk dat deze bezorgdheid wat overtrokken is. Immers:

Onderzoek leiden kunnen we allemaal. Het enige probleem is, dat die paar mensen die eigenhandig onderzoek doen, daarbij niet de minste behoefte hebben aan enige leiding, van wie dan ook.

Sommigen zien als taak van een technische universiteit het combineren van bestaande kennis tot iets

nieuws dat nuttig is. Er van uitgaande dat er in het verleden voldoende kennis gegenereerd is, is het onze taak maatschappelijke en industriële problemen op te lossen door het vakkundig en slim toepassen van die aanwezige kennis. Ik geloof helemaal niet dat dit model juist is, maar voor vakken als technische natuurkunde en technische scheikunde, die fundamentele zusterfaculteiten hebben op algemene universiteiten, is het niet volslagen onzin om zo iets te denken. Vroeger heette dit: de TH's moeten geen universiteitje willen spelen. Er zijn echter ook technische vakken zoals werktuigbouwkunde en elektrotechniek die hun eigen fundamentele wetenschap zullen moeten genereren, want anderen zullen dat niet voor hen doen.

Ruis is een elektrotechnisch probleem dat niet noodzakelijkerwijze een elektrotechnische oplossing heeft. Van de 1/f ruis heb ik al aangegeven dat de oplossing eerst chemisch leek en later fysisch. Ik kan niet uitsluiten dat de oplossing wiskundig zal zijn, gezien het alomtegenwoordige karakter van de 1/f ruis. Mij lijkt dat zolang 1/f ruis een onopgelost elektrotechnisch probleem is, het onderzoek ervan op een elektrotechnische faculteit thuis hoort; onafhankelijk of er bij de oplossing scheikunde, natuurkunde of wiskunde te pas komt. Wil iemand dat onderzoek daarom multidisciplinair noemen, mij best, zolang

hij maar geen multidisciplinaire organisatie voorstelt. In een multidisciplinair ruisteam zouden elektrotechnici, fysiologen, chemici en fysici nodig zijn geweest. Bovendien hadden we de beschikking moeten hebben over een elektronenversneller en een cyclotron. Dit zou een gigantische en dure organisatie gevraagd hebben waarbij ieder van deze mensen en faciliteiten slechts gedurende een deel van de tijd een essentiële bijdrage levert.

Zo een logge organisatie werkt dus niet. In plaats daarvan is het beter een kleine permanente kern te hebben die zo nodig voor korte tijd gelegenheidscoalities sluit met deskundigen van buiten. Wat de bemanning van de kern betreft, is het net als bij de 1/f ruis: het gaat niet om aantallen, maar om beweeglijk-

heid. Ons ruisonderzoek is steeds uitgevoerd met slechts drie volwassenen, drie AIO's en een halve ton per jaar. Met een multidisciplinaire organisatie zouden we om de paar jaar overbodige mensen hebben gehad, omdat hun discipline dan niet meer nodig was. Als zo een empire zich zou willen aanpassen en nieuwe terreinen zou willen betreden, dan kan dit alleen tegen een hoge maatschappelijke prijs. Voor leiders met visie is dit niet onoverkomelijk. Die prijs wordt namelijk niet betaald door de empire builders maar slechts door de overbodige onderdanen van het vergeten empire.

Met een kleine permanente kern is samenwerking met anderen een absolute noodzaak. Samenwerking moet. We doen het ook, alleen we

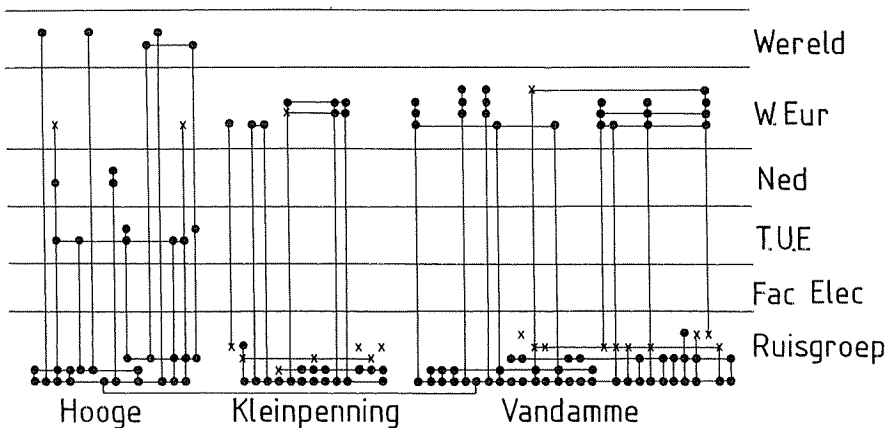


Fig. 4 Herkomst van de auteurs van publicaties met twee of meer auteurs over de jaren 1993 tot en met 1995

- Vertikale lijn : publicatie met twee of meer auteurs
- Horizontale lijn : publicaties van dezelfde auteur
- Kruisjes : studenten (geen promovendi)

doen het met steeds wisselende partners. Een goed beeld van de wisselende coalities krijgen we als we naar de publikaties van de laatste drie jaar kijken. Fig. 4 toont publikaties van de jaren 1993, '94 en '95 met twee of meer auteurs. Opgenomen zijn publikaties, voordrachten op conferenties en posters. Iedere verticale lijn is een publikatie. De punten of horizontale balken geven de verschillende auteurs aan. Rechts is aangegeven waar de auteurs vandaan komen: waarbij iedere hogere laag de er ondergelegen laag uitsluit. Beginnen we bovenin. Visionaire bestuurders verwachten hier Berkeley en M.I.T. Dat hebben we niet kunnen realiseren. We zijn blijven steken bij Vilnius, Kyoto en Nizhni Novgorod. Sorry. Bij West-Europa moet vooral onze samenwerking met Montpellier en Leuven vermeld worden. De laag TUE betreft onze zeer intensieve samenwerking met Wolter's groep. De laag, aangeduid met Faculteit Elektrotechniek is leeg. Laat ik daar op deze feestelijke bijeenkomst één zin aan wijden. Samenwerking komt niet van de grond als een partner uitgaat van wat we zouden willen en de andere partner van wat we werkelijk kunnen. Wat organisatie-deskundigen op zal vallen, is dat de drie bundels geen interactie hebben, ook is er geen spoor van commandolijnen of van gedeelde bevoegdheden. Is het ruisonderzoek als geheel al een voorbeeld van versnippering van midde-

len van de faculteit, dan zien we hier versnippering binnen de versnippering. Het wordt fractaal, maar nog niet chaotisch. Gezien onze output is versnippering kennelijk niet contraproductief. Effecten van versnippering moeten niet bediscussieerd worden aan de hand van een abstract organisatiemodel, maar blijken wel uit de output. Ook hier geldt: Denken is goed, kijken is beter. Versnippering is de kracht van onze organisatie. Ieder heeft zijn eigen jachtterrein, ook de beginnende promovendus. Omdat succes vele vaders kent, moet de huid van de beer verdeeld worden, voordat het beest geschoten is.

De kruisjes verwijzen naar studenten, die als stagiaires of afstudeerders zulke bijdragen aan het onderzoek leverden dat ze daarmee mede-auteur geworden zijn. De buitenlandse studenten zijn niet gelokt met professioneel ontworpen folders in vierkleurendruk. Zij kwamen om deel te nemen aan onderzoek, dat bij hun eigen universiteit goed bekend was. Studenten internationaal uitwisselen is een symmetrische activiteit. Daarom is het voor de internationalisering van het onderwijs aan onze eigen studenten noodzakelijk dat buitenlandse universiteiten ons onderzoek goed kennen, en er zo op kunnen vertrouwen dat hun studenten hier iets meer leren dan alleen een continentale variant van het Engels.

Ik vat mijn verhaal nu samen. Denken is goed, kijken is beter. Dit geldt zowel voor het onderzoek naar de oorsprong van de 1/f ruis als voor de organisatie van onderzoek. Bij de organisatie speelt ook nog de tegenstelling tussen willen en kunnen. Deze tegenstelling is verwant aan die tussen denken en kijken. Een goed uitgangspunt voor het organiseren van het onderzoek van onze faculteit lijkt me: kijk wat we kunnen.

Aan het slot van deze academische plechtigheid, beseffend dat we al jaren een universiteit zijn, pas ik de formulering wat aan. Ik ga terug naar de 13^e eeuwse Universiteit van Parijs en citeer Albertus Magnus:

**EXPERIMENTUM SOLUM
CERTIFICAT**

Vormgeving en druk:
Reproductie en Fotografie van de CTD
Technische Universiteit Eindhoven

Informatie:
Academische en Protocolaire Zaken
Telefoon (040-247)2250
ISBN 90 386 0479 7



F.N. Hooge werd in 1930 geboren te Amsterdam. Hij studeerde scheikunde aan de Universiteit van Amsterdam, waar hij in 1956 promoveerde op een infrarood spectroscopisch onderwerp. Daarna werkte hij op het Natuurkundig Laboratorium van Philips aan halfgeleiders, zich vanaf 1968 concentrerend op ruis.

In 1971 werd hij benoemd tot hoogleraar Elektrotechnische Materiaalkunde aan de Faculteit Elektrotechniek van de Technische Hogeschool Eindhoven, de huidige Technische Universiteit Eindhoven. Van 1983 tot 1985 was hij dekaan van de Faculteit Elektrotechniek en van 1985 tot 1988 Rector Magnificus van de TUE. In 1989 ontving hij een eredoctoraat van de Universiteit van Strathclyde te Glasgow.