

Intreerede

Uitgesproken op 9 mei 2003
aan de Technische Universiteit Eindhoven

de natuur tegemoet met pen en pc

prof.dr. U.M. Ebert

Introductie

Meneer de Rector Magnificus, beste collega's, vrienden en familie, dames en heren,

'De natuur tegemoet met pen en pc' is de titel van mijn rede. Terwijl bijna al mijn collega's hier binnen de faculteit Technische Natuurkunde de natuur tegemoet treden met passieve en actieve meetapparatuur, doe ik het dus met potlood en computer. Daarom lijkt het me de moeite waard om in het eerste deel van mijn rede in te gaan op de mogelijkheden van de theoretische natuurkunde met zijn wiskundige en numerieke gereedschap. Wat kan ik met pen en pc? En is een potlood eigenlijk nog nodig, nu we zulke snelle computers hebben?

Voor ik op de details inga, geef ik alvast een eerste, kort antwoord op deze vraag:

Net zoals de combinatie van verschillende experimentele methodes een beter beeld oplevert van een ingewikkeld natuurkundig verschijnsel, zo is dat ook het geval bij de combinatie van theoretische methodes. Numerieke berekeningen kunnen je een heel concreet beeld voor specifieke parameterkeuzes geven, maar het is lastig om algemene parameterafhankelijkheden te verkennen. En soms heb je ook geen goede greep op numerieke fouten.

Anderzijds, met analytische berekeningen kun je niet ieder probleem aan, maar je kunt er wel bijvoorbeeld limietgevallen en algemene parameterafhankelijkheden mee bepalen, specifieke meetgrootheden mee voorstellen, en ze kunnen je helpen om de correctheid van numerieke programma's aan expliciet bekende oplossingen te toetsen. Ik zal straks voorbeelden laten zien van deze complementariteit tussen een analytische en een numerieke berekening.

Een groot voordeel van theorie is, dat je er heel handig mee van systeem kunt veranderen. Zo hebben we in de afgelopen jaren vrijwel identieke analytische en numerieke methodes eerst op een biologisch en daarna op een plasma-fysisch verschijnsel toegepast. Aan de ene kant omdat we geïnteresseerd waren in de wisselwerking tussen licht en in het water



drijvende, kleine plantjes, het zogenoemde phytoplankton, dat licht nodig heeft en 'opslokt' [1], en aan de andere kant in de wisselwerking tussen groeiend plasma en het zelf opgewekte elektrische veld in een stationaire glimontlading, die nauw verwant is aan de TL-buis [2]. Het is een interessante ervaring om een biologisch laboratorium te verkennen waar onderzoek naar micro-organismen gedaan wordt. Het is een heel andere wereld dan een plasma-fysisch laboratorium; ook de manier van publiceren en 'referee-en' verschilt behoorlijk. Maar uiteindelijk worden de verschijnselen door soortgelijke partiële differentiaalvergelijkingen beschreven, en ook de wiskundige methodes die je voor het onderzoek nodig hebt zijn vrijwel identiek.

Soms is theorie nog krachtiger en zijn niet alleen de methodes, maar ook de resultaten van verschillende fysische systemen identiek. Zo'n verschijnsel noem je universeel.

In de statistische fysica is er sinds de jaren 70 veel boeiend werk op het gebied van de zogenoemde 'kritische verschijnselen' verricht. In de buurt van het kritische punt hoeft je eigenlijk helemaal niets van



een concreet systeem af te weten; je hoeft alleen maar zijn symmetrie-eigenschappen te kennen.

Zo zijn bijvoorbeeld de ruimtelijke correlaties op het kritische punt van een ontmengende vloeistof en op het kritische punt van een vast-vloeistof fase-overgang identiek. Dit is zo, omdat de ordeparameters dezelfde 'binaire' o/r -symmetrie hebben: vaste stof of vloeistof oftewel A- of B-rijke fase.

Een andere symmetrie van de ordeparameter, die ook andere ruimtelijke correlaties tot gevolg heeft, is de zogenoemde XY-symmetrie. Daarbij is de ordeparameter een vector van vaste lengte, die in een willekeurige richting in een vlak kan wijzen. Voorbeelden van zulke systemen zijn supergeleiders, superfluids en een zeker soort ferromagneten, waarbij de magnetisering door anisotropie van het kristalline rooster beperkt is tot een vlak. Fysisch zijn dat heel verschillende systemen, maar voor de correlaties hoeft je niets meer te weten dan dat je te maken hebt met een systeem op zijn kritisch punt, dat een ordeparameter met een bepaalde symmetrie heeft.

De wiskundige analyse van de universele eigenschappen van zulke kritische verschijnselen maakt gebruik van renormalisatiegroep-methodes. De ontwikkeling van deze theorie heeft veel baat gehad bij parallele wiskundige ontwikkelingen in de quantum-veldentheorie, die elementaire deeltjes probeert te beschrijven en daar erg succesvol in is. Maar renormalisatiegroep-theorie is ook toepasbaar op lange zelf-afstotende polymeerketens. Daaraan heb ik enkele jaren gewerkt [3]. Het verbazingwekkende is, dat je eigenlijk helemaal niets hoeft af te weten van de scheikundige aspecten van je specifieke polymeer. Je hoeft alleen maar te weten, dat je te maken hebt met een keten van heel veel identieke onderdelen die elkaar lokaal afstoten.

Aan dit onderzoek heeft me altijd geboeid, dat je dus kunt kiezen of je de universele voorspellingen van dezelfde renormalisatiegroep-methodes toetst in de enorme deeltjesversnellers, de 'kathedralen van de moderne tijd', of in een gewoon polymeer-scheikundig laboratorium.

Wat kan analytische theorie je opleveren? Ze laat je zien, dat een verschijnsel niet van een heleboel parameters met allerlei fysische dimensies (kg, m/s etc.) afhangt, maar van slechts enkele dimensieloze combinaties van fysische parameters.

Je kunt eerst de limiet van een oneindig lange keten uitwerken, en



dan de correcties hierop voor ketens van eindige lengte. De analyse laat je zien, dat de parameter-afhankelijkheden alleen de vorm van zekere functies kunnen aannemen, en dat iedere andere poging om je experimentele data te 'fitten' gewoon niet strookt met de onderliggende fysische wetten. De analyse bepaalt dus de manier waarop je je experimentele data kunt proberen te ordenen en te begrijpen.

Nu heb ik in mijn analytisch verhaal een zeker kruispunt bereikt waarop ik een methodekeuze moet maken. Ik heb het namelijk gehad over de correcties op de theorie van een oneindig lange keten, dus over verstoringstheorie. De keuze van een goede exacte oplossing in handige parameters en daarna de keuze van goede ontwikkelingsparameters voor de verstoringstheorie is een kunst die veel ervaring en inzicht vergt. Inzicht is nodig in zowel het fysische verschijnsel als in de wiskundige structuur van de theorie.

Nu lijkt er in de omgang met de verstoringstheorie op dit moment een zekere scheidslijn tussen toegepaste wiskunde en theoretische natuurkunde te liggen, hoewel deze scheidslijn de afgelopen jaren een erg dynamische ontwikkeling heeft doorgemaakt en ook aan nationale verschillen onderhevig is. Ten opzichte van de verstoringstheorie kun je namelijk een principiële of een pragmatische houding innemen. De principiële houding is, dat bijvoorbeeld een asymptotische reeks, die dus een verdwijnende convergentieradius heeft, niets kan betekenen op een eindige afstand van het punt van ontwikkeling. Je moet dan of meer weten over de structuur van de ontwikkeling, of je moet bewijzen dat de afwijking een zekere grens niet kan overschrijden. Zo'n analyse vraagt vaak om hard en moeilijk werk. Maar vanuit strikt wiskundig oogpunt is dit de juiste benadering.

Je kunt de zaak ook pragmatisch aanpakken: uit ervaring en fysisch inzicht neem je aan, dat ook een reeks met een verder onbekende convergentieradius tot een goede benadering kan leiden, hoewel je de vraag wiskundig niet helemaal uitgezocht hebt.

In plaats daarvan kun je de storings theoretische resultaten vaak aan numerieke resultaten toetsen. Nu zijn in numerieke berekeningen de kleinere systemen makkelijk te onderzoeken, en je moet er hard aan werken om redelijk grote systemen te bereiken, terwijl je de analytische resultaten vaak door een ontwikkeling rond een oneindig groot systeem vindt.

Uiteindelijk helpt het vergelijken van numerieke en analytische resultaten

om de fouten van allebei de methodes te bepalen en tot een betrouwbare fysische voorspelling te komen die je dan weer aan het experiment kunt toetsen.

Maar wacht eens, waarom moet je dan de numerieke berekeningen toetsen? Is een resultaat dan niet een resultaat?

Sinds ik aan het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) samenwerk met collega's uit de numerieke wiskunde, is me nog duidelijker geworden hoe niet-triviaal deze vraag is. Natuurlijk implementeer je in het algemeen niet de modelvergelijking zelf, maar een discrete versie ervan. Het is een hele wetenschap (namelijk de numerieke wiskunde) om te bepalen welke discretisatiemethode op welk rooster tot welk resultaat leidt.

In de discretisatie kun je verschillende keuzes maken. Als je het bijvoorbeeld belangrijk vindt, dat een zekere grootheid aan een behoudswet voldoet of dat een andere grootheid niet negatief wordt, omdat dat onfysisch zou zijn, dan kun je daarvoor een speciale discretisatie kiezen. Maar dan doet de berekening het misschien weer slechter op andere grootheden. Want de discrete vergelijking is nu eenmaal niet identiek aan de continue!

Dit soort vragen kom je met name tegen, als je tijdsafhankelijke berekeningen in twee of drie ruimtelijke dimensies wilt uitvoeren, want dan kun je je rooster niet zo fijn maken dat vrijwel iedere discretisatiemethode uiteindelijk convergeert. Je zit namelijk met de beperkte grootte van de cpu van je computer. In de leuke, grafische output zie je dus niet de oplossing van je continue vergelijking, maar altijd de oplossing van de discrete vergelijking. De verhouding tussen die twee vraagt om kennis en interpretatie.

Maar ook bij eenvoudigere problemen kunnen numerieke oplossingen voor verrassingen zorgen. Je kunt bijvoorbeeld een gewone differentiaalvergelijking in een commercieel programma zoals Mathematica of Maple stoppen. Zonder je verder ergens mee te hoeven bemoeien, krijg je zo een grafisch resultaat van het geïntegreerde resultaat op je scherm. Hoef je dan dus niet meer te kunnen rekenen? Onder theoretici zijn talloze verhalen over onjuiste oplossingen van zulke programma's. Mijn eigen meest recente ervaring was met de integratie van $\frac{d_j(x)}{dx} = \alpha(x) j(x)$ met een reële functie $\alpha(x)$ en een positieve beginwaarde $j(0) > 0$. Bij integratie met een veel gebruikt commercieel

programma werd de functie $j(x)$ soms negatief. Ik hoop, dat alle tweedejaarsstudenten natuurkunde nog steeds in staat zijn zich ervan te overtuigen, dat zo'n resultaat alleen maar door een numerieke fout tot stand kon komen!

Over computerfouten gesproken: natuurlijk ben je met de computer ook altijd afhankelijk van technische ondersteuning. Laten we beginnen met de hardware. Toen ik in het weekeind thuis aan dit stuk zat te werken, leken sommige toetsen op mijn toetsenbord het te begeven. Ik heb even overwogen of het mogelijk zou zijn een rede zonder de letters I en K en zonder komma's te schrijven, maar gelukkig was de storing door te veel zon op mijn bijna zwarte laptop ontstaan en na afkoeling weer verdwenen. (Want uiteindelijk is een computer natuurlijk ook maar een bak atomen en gericht rondlopende elektronen.)

Dergelijke volstrekt nutteloze en tijdrovende uitdagingen zijn vrij regelmatig aan de orde als je met de computer werkt, en kom je niet tegen als je met een potlood werkt. Er is altijd wel een mogelijkheid om een potlood snel te repareren of te vervangen, en zo niet, dan schrijf je zoals Pythagoras met de vinger in het zand – nou ja, dat kan ik doen bij mij thuis aan de Hollandse kust.

Als je dus de keuze hebt om een theoretische klus met de computer of met het potlood te klaren, doe het dan met het potlood. Je bent dan minder afhankelijk van technische fouten. Je bent minder bezig met de computertechniek en -taal en meer met het probleem zelf. En je weet: je hebt volledige controle over de klus, je bent voor alle resultaten en fouten zelf verantwoordelijk, want deze zitten in je brein en nergens anders.

Ik hoop dat u het nu met me eens bent, dat het noodzakelijk is om bij ieder numeriek resultaat van tevoren een verwachting te hebben over de uitkomst. Pas dan weet je, of je de resultaten kunt vertrouwen of niet. Als je dus een numeriek resultaat vindt dat je niet verwacht, dan wordt de zaak spannend: of je ziet een nieuwe oplossing van je model die je nu moet begrijpen en analyseren, of je ziet een programmeerfout of een numeriek artefact. Helaas is het tweede veel waarschijnlijker.

Zo gezien voer je op de computer dus eigenlijk een experiment uit. In analogie met de in vivo of de in vitro experimenten in de biologie wordt zoiets ook wel een in silico experiment genoemd: je zet je parameters op zekere waarden vast, je draait de discrete versie van je



modelvergelijkingen, en je krijgt er datafiles en grafieken uit. Aan de eigenlijke theorie, dus aan begrip en interpretatie, moet je dan nog beginnen.

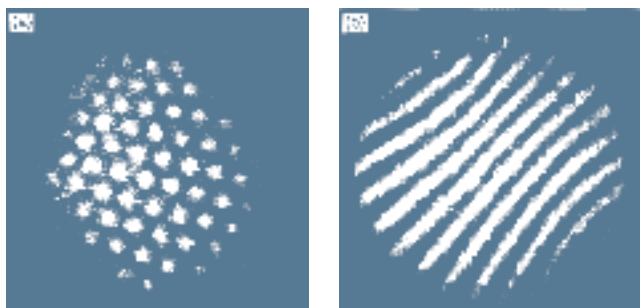
Laat me daarom even terugkomen op deze 'eigenlijke theorie'. Ik heb het eerder gehad over een van de hoogtepunten in de statistische fysica, namelijk het herkennen en afleiden van universele wetten uit eenvoudige symmetrieprincipes. Aan de ene kant is veel van dit soort onderzoek op het gebied van systemen in thermisch evenwicht verricht. Aan de andere kant zijn talloze systemen ver van het evenwicht, en evolutie en transport zijn belangrijke eigenschappen. De Grieken hebben al vroeg beweging en verandering als een centrale eigenschap van de natuur gezien: 'παντα ρει, alles stroomt'. Nu staat water in evenwicht stil, en stroming vindt alleen in een gedreven systeem plaats. 'Gedreven' betekent hier 'niet al lang afgesloten van de buitenwereld en dus in evenwicht, maar van buiten af gedreven'. Stroming en scheikundige reacties in onze atmosfeer worden gedreven door straling van de zon. En de zon straalt

alleen, omdat ze niet in evenwicht is met het heelal. Ook leven is alleen in niet-evenwicht mogelijk, anders zou de entropie toenemen en alle innerlijke orde van organismes vernietigen.

Het is dus overduidelijk waarom theoretici na de grote successen in de theorie van evenwichtssystemen ook naar universele wetten in systemen ver van evenwicht zoeken. Eigenlijk ligt dat in het verlengde van de Griekse natuurfilosofie: kun je met eenvoudige geometrische overwegingen de natuur verklaren?

Hier een voorbeeld uit recent onderzoek van een universele wet in systemen ver van evenwicht: maak een dunne laag van een isotroop en homogeen materiaal. Zet een drijvende kracht aan weerskanten van de laag, bijvoorbeeld een temperatuurverschil of een scheikundig of elektrisch potentiaalverschil. Neem aan, dat boven een kritische waarde van je drijvende kracht het systeem spontaan maar geleidelijk een ruimtelijke structuur met een zekere golflengte vormt. Golflengte en amplitude van de structuur kun je vaak berekenen met een zogenoemde 'zwak niet-lineaire analyse' van de onderliggende vergelijkingen. Als er geen symmetrie bestaat tussen de boven- en onderkant van het systeem, dan zul je in het algemeen een hexagonaal patroon zien. Maar als de symmetrie er wel is, dan zie je bijvoorbeeld regelmatige strepen [4].

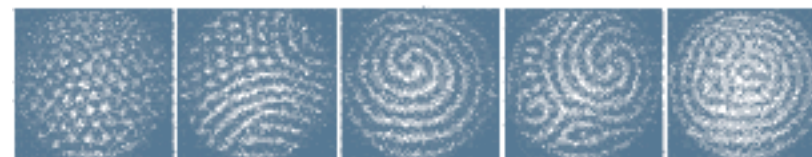
figuur 1



Dit algemene principe is toepasbaar op scheikundige reactoren, die van weerskanten met reactanten gevoed worden, op van de onderkant verwarmde vloeistoffen die beginnen te convecteren, en op door elektrostatische potentialen gedreven ontladingen [5], zoals in de figuren boven.

Het is ook mogelijk dat de spontaan ontstane ruimtelijke structuren met een zekere snelheid bewegen in de richting parallel aan de laag – analytisch gesproken zijn dan zekere eigenwaardes complex in plaats van reëel. Als de groepssnelheid van de lopende golven het juiste teken heeft, dan ontstaan doorgaans een of meerdere spiralen, en die zien er alle ongeveer hetzelfde uit, of je nu een hydrodynamisch, scheikundig, plasma-fysisch (zoals in het volgende plaatje [6]) of biologisch probleem onder handen hebt.

figuur 2



Ikzelf heb recent een bijdrage geleverd aan de analyse van universele eigenschappen van een ander type niet-evenwichtssystemen, namelijk van propagerende niet-evenwichtsfronten [7]. Maar dat vertel ik graag een andere keer in meer wiskundige termen.



Elektrische doorslag en plasmafysica

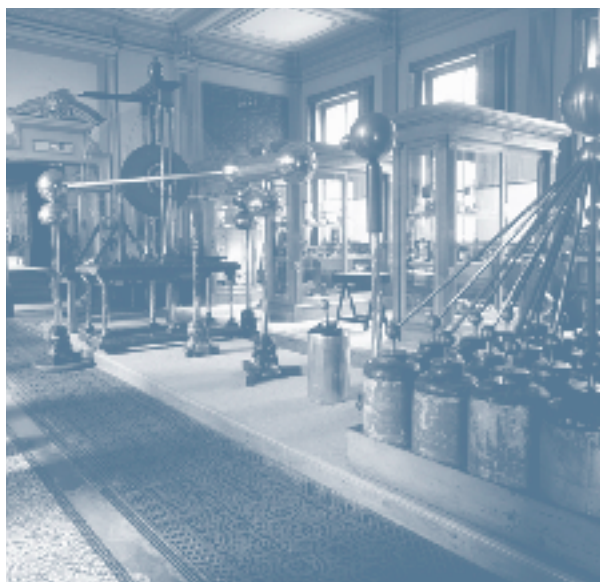
Dames en heren, tot nu toe heb ik het gehad over het vak theoretische natuurkunde, zijn methodes en zijn toepassing op verschillende verschijnselen in de natuur. Daarbij ben ik dwars door de vakkenindeling van NWO en FOM gekruist, met een beetje niet-lineaire analyse, een beetje numerieke wiskunde, fenomenologische fysica, gecondenseerde materie en plasma-fysica en een uitstapje naar de biologie. In het tweede deel van mijn rede zal ik een andere invalshoek kiezen: ik zal me richten op een klasse van natuurkundige verschijnselen en uitleggen hoe je die met verschillende methodes kunt onderzoeken om een steeds betrouwbaarder en vollediger begrip te ontwikkelen. Ik zal de stand van zaken en de centrale vragen belichten. Ik wil het hebben over de elektrische doorslag, vonk of bliksem.

figuur 3



Elektrische verschijnselen zoals vonken en bliksems trekken waarschijnlijk al de aandacht sinds de menselijke soort aandacht kan opbrengen. In veel culturen zijn bliksem en donder attributen en wapens van machtige goden. Sinds de 18e eeuw zijn mensen steeds beter in staat om elektrische verschijnselen zelf te manipuleren en op te roepen. Amerikanen zullen gauw Benjamin Franklins ontwikkeling van de bliksemafleider aanhalen, Fransen zullen naar publieke experimenten met ontladingen en de werking van stroom op dierlijke lichamen wijzen, Duitsers zullen het over Lichtenberg-figuren hebben. En ook op Nederlandse grond zijn indrukwekkende experimentele opstellingen te vinden. Zo huisvest het Teylers Museum in Haarlem deze prachtige elektriseermachine uit 1784, waarmee vonken over een afstand van bijna een meter opgewekt konden worden (zie figuur 4).

figuur 4



Let ook op het houtsnijwerk aan de tafel boven de glazen poten en – op de voorgrond – op de groep Leidse flessen voor het opslaan van de elektrische lading. Een werkende kopie van deze opstelling bevindt zich hier aan de Technische Universiteit Eindhoven op de

faculteit Elektrotechniek. Ook in moderne wetenschapsmusea hoort het opwekken van bliksems over een afstand van enkele meters tot de publiekstrekking, in het Deutschen Museum in München net zoals in la Musée de la Découverte in Parijs.

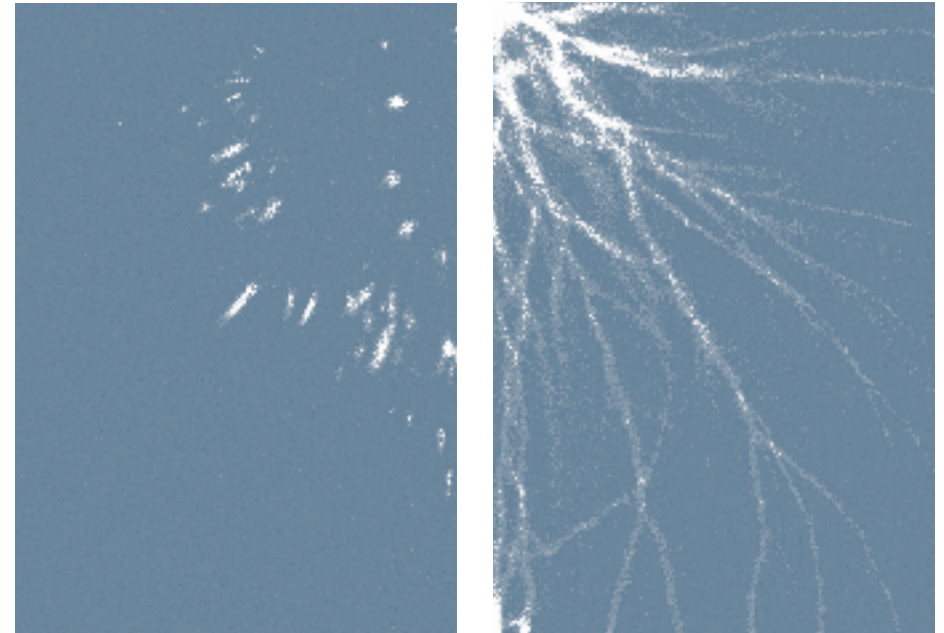
Maar wat begrijpen we eigenlijk van zo'n elektrische doorslag? Ten eerste hoort hij thuis in het gebied van de zogenoemde 'lage temperatuur plasmafysica'. 'Lage temperatuur' betekent, dat de temperatuur eigenlijk te laag is voor de vorming van een thermisch plasma en dat er dus iets anders aan de hand is. Vanuit het klassieke oogpunt wordt vaak gezegd, dat plasma's de vierde toestand van de materie zijn, en dat 99% van de bekende materie in het heelal niet gasvormig, vloeibaar of vast is, maar zich in de plasmatoestand bevindt. Aan de andere kant hoort het niet-evenwichtsplasma aan de binnenkant van een vonk eigenlijk niet in dit rijtje, want zo'n plasma kan tijdelijk weer in een gas, vloeistof of vaste stof bestaan. Het is sowieso gebruikelijk in de vaste stof-fysica, dat je de elektronen in een geleidingsband samen met hun donoren een plasma noemt, want hun elektrisch gedrag is hetzelfde. Maar door een sterk elektrisch veld aan te leggen kun je ook in de meeste stoffen die anders nauwelijks geleidend zijn een niet-evenwichtsplasma opwekken. Zo propageert een vonk op soortgelijke manier door lucht, water, olie, halfgeleiders, plexiglas, et cetera. De vonk is dus een specifiek dynamisch fenomeen, die in vrij willekeurige materialen kan optreden. Daarbij is de elektrische wisselwerking van het plasma aan de binnenkant met de niet-geïoniseerde omgeving erbuiten essentieel. Dit proces is tot nu toe maar ten dele begrepen, en ik wil nu verder uitleggen welke inzichten wij hierover verworven hebben en wat we er verder mee willen gaan doen.

Maar eerst moet ik beter definiëren waar ik het over wil hebben. Voor het gemak en omdat u dan iets voor ogen heeft, heb ik de woorden 'vonk' en 'bliksem' gebruikt. Vonken en bliksems duren delen van secondes; daarom zijn ze ook met het blote oog te zien. Maar dit waargenomen licht ontstaat door veel opeenvolgende stroompulsen, die ieder op zich te snel zijn voor onze zintuigen. Deze stroompulsen lopen langs geïoniseerde kanalen, en die moeten eerst ontstaan. Ik zal het nu verder hebben over het ontstaan van deze geïoniseerde kanalen helemaal in het begin van de ontlading, in feite op de tijdschaal van nano- tot microsecondes.



Het zal duidelijk zijn, dat details van het ontstaan van de geïoniseerde kanalen experimenteel niet eenvoudig zijn waar te nemen. Een oude techniek is de zogenoemde streak-fotografie, waarbij je in plaats van de gebruikelijke ronde lens een dunne spleet hebt waarachter je de te belichten film snel doortrekt [8]. Op die manier ontstaat een tijdsafhankelijk beeld van een één-dimensionale doorsnede van het gebeuren. Deze plaatjes zijn natuurlijk voor interpretatie vatbaar. Veel mooiere plaatjes zijn verkrijgbaar met moderne, snelle CCD-camera's. Daarmee kun je met een heel korte belichtingstijd heel nauwkeurig gewone foto's maken. De hoeveelheid digitale data die je in de camera opslaat leidt helaas tot een zekere beperking. Het duurt namelijk ruwweg enkele secondes voor je deze data voor opslag naar een computer hebt doorgestuurd. Pas dan is de camera klaar voor de volgende foto. Voor een verschijnsel dat een miljoenste of een miljardste van een seconde duurt, moet je dus vrij precies weten, op welk moment het interessant is om een foto op te nemen. Als je daar controle over hebt, dan kun je sinds kort een opname van een miljardste seconde maken, en op die manier nauwkeurig inzicht in het proces verkrijgen. Eddie van Veldhuizen van de TU/e heeft dat tot een kunst verheven en maakt internationaal de meest nauwkeurige opnames^[9]. Laten we dus naar zijn foto's kijken.

De experimentele opstelling is als volgt: boven een platte elektrode hangt een metaalnaald. De afstand is 2,5 cm en daartussen bevindt zich gewone lucht. Op de naald wordt plotseling een positieve elektrische spanning van 25 kV gezet, waarna een stelsel van geïoniseerde kanaaltjes ontstaat tussen de elektrodes. Op een foto met een belichtingstijd van een microseconde, zoals rechts in figuur 5, zie je dat niet een enkel geïoniseerd kanaal ontstaan is, maar een hele vertakkende bos ervan. De takken lopen niet alleen radiaal van de naald weg, maar splitsen zich ook spontaan op enige afstand van de emitterende naald. Op de foto links is hetzelfde proces afgebeeld, maar nu met een belichtingstijd van vijf nanosecondes. In plaats van de langgerekte kanalen zie je nu enkele (soms langgerekte) lichtpuntjes. Andere foto's laten zien, dat hoe langer de belichtingstijd is, hoe langer de kanalen lijken te zijn. De conclusie is duidelijk: de kanalen emitteren niet tegelijkertijd langs hun hele lengte licht, maar licht wordt alleen door de vooruitgroeïende punten van de kanalen uitgezonden. Deze actieve groeigebieden zijn dus nu onmiddellijk experimenteel zichtbaar, en dus ook hun groeisnelheid, grootte, et cetera.



figuur 5

Dit zijn fantastische nieuwe experimentele gegevens over groei en vertakking van de geïoniseerde kanalen (en meer doeltreffende experimentele methodes zijn nu in de ontwikkeling, met name ook hier in Eindhoven). Daardoor hebben we greep op de experimentele feiten op hun intrinsieke tijdschaal, en kunnen we nu proberen de onderliggende natuurkundige processen te begrijpen.

Microscopisch zijn er drie belangrijke mechanismes aan de gang. Ten eerste kunnen elektronen in sterke elektrische velden door botsingsionisatie meer elektronen en ionen opwekken. Daardoor ontstaat er meer geïoniseerde materie, dus plasma. Dit extra plasma ontstaat op plekken waar elektronen en hoge velden beide aanwezig zijn. Het zijn precies deze actieve gebieden van plasmagroei die het licht emitteren dat op de experimentele plaatjes te zien is.

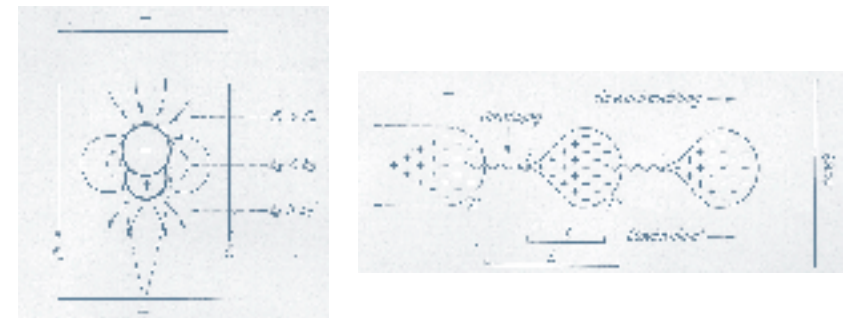


Ten tweede; waar elektrische velden liggen, drijven vrije elektronen en ionen in tegengestelde richtingen.

Ten derde kan een hoge concentratie van elektronen en ionen door ruimteladings-effecten het lokale elektrische veld veranderen en dus de plaatsen van de actieve gebieden. Het proces wordt dan dus sterk niet-lineair: veld en plasma samen maken meer plasma, het veld polariseert het plasma en de ruimteladingen van het plasma veranderen het veld.

Nu is de vraag of en hoe deze mechanismes de experimenten kunnen verklaren. Sinds de jaren 30 is er een zeker beeld ontstaan over de voorspellingen van zo'n simpel model. De conclusie was tot voor kort: het vooruitgroeien van de kanalen kun je er ongeveer mee verklaren, maar het vertakken niet. Daar denken we nu anders over. Wij hebben recent voorgesteld, dat dit model zonder toevoegingen ook de vertakkingen kan verklaren; en daar wil ik het nu over hebben. De stap die we hierbij moeten nemen is vergelijkbaar met de stap van de Navier-Stokes-vergelijking naar de turbulentie: de basisvergelijkingen zijn er, maar wat zijn nu hun relevante oplossingen?

Laat me eerst het oude beeld schetsen van de oplossingen en voorspellingen van ons simpele ontladingsmodel: Raether [10] in Hamburg en Loeb en Meek [8] in de VS hebben eind jaren 30 begrepen, dat ruimteladingen een belangrijke rol spelen bij het ontstaan van het geleidend kanaal. Een publicatie van Raether uit 1939 laat het beeld links in figuur 6 zien: een ionisatielawine in een van buiten aangelegd veld verdeelt zich in een negatieve ruimtelading in de kop van het kanaal en een achterblijvende positieve ruimtelading. Op die manier wordt het veld voor de kop sterker en in de kop zwakker. Het sterkere veld voor de kop leidt tot een grotere groeisnelheid dan eerder in de lawinefase, want zowel de elektronendrift als het aanmaken van extra plasma gaat harder. Naast zijn nauwkeurig experimenteel onderzoek heeft Raether ook geprobeerd te schatten, of de uit zijn fysisch beeld resulterende hogere groeisnelheid voldoende was om de experimenteel gemeten snelheden te verklaren. Bij zijn schatting ging hij uit van twee homogene geladen bollen en hij vond dat het veld voor het kanaal niet sterker kon worden dan ongeveer twee keer het aangelegde achtergrondveld. De driftsnelheden in het zo geschatte veld waren niet voldoende voor de verklaring van de experimenten. Daarom (en ook vanwege metingen aan kanalen met een positieve lading in de kop) nam hij aan, dat er nog

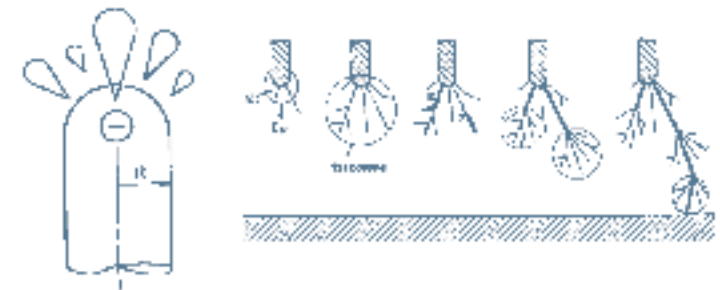


figuur 6

een extra mechanisme toegevoegd moest worden. Dit is te zien in het rechter plaatje. Hier ontstaan enkele fotonen bij de botsingsprocessen in de kanaalkop, die verderop weer nieuwe lawines opwekken.

Deze plaatjes zijn beeldbepalend geweest voor de verdere conceptontwikkeling – zonder dat hun voorspellingen voor gegeven parameters ooit kwantitatief zijn uitgewerkt. Ze zijn wel tot op de dag van vandaag vaak collegestof in de elektrotechniek. Als je met dit beeld aan de slag gaat, dan lijken ook de vertakkingen van de kanalen er op een natuurlijke manier uit te rollen. Dit is te zien in de volgende twee plaatjes: als er tegelijkertijd verschillende lawines in verschillende richtingen ontstaan, dan gaan de kanalen zich vertakken [11].

figuur 7

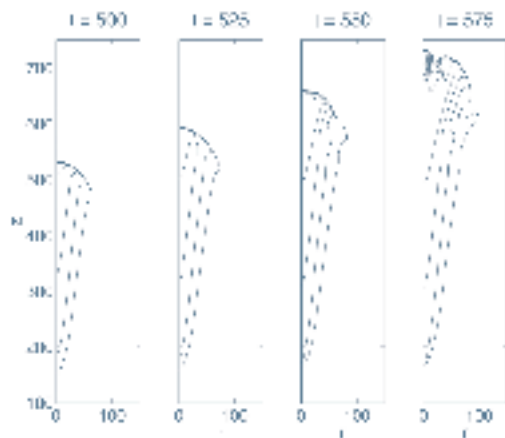




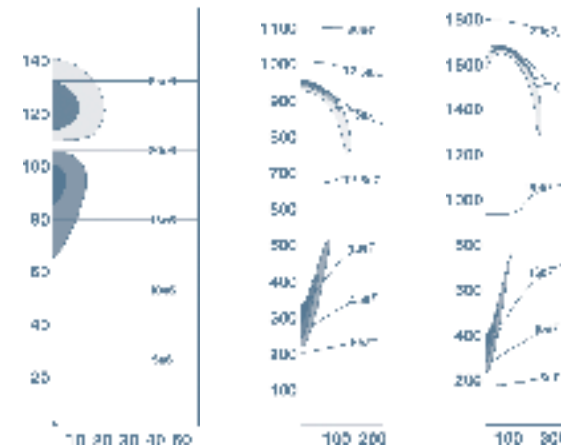
Maar kloppen deze mechanismen wel? Moderne theorie levert andere fotocrosssecties op dan aan deze plaatjes ten grondslag liggen – hoewel die natuurlijk ook afhangen van het specifieke gas of gebruikte medium. En zal ieder optreden van twee lawines tegelijkertijd wel tot een kanaalsplitsing leiden?

Wij hebben recent een volstrekt ander beeld voor het vertakken van vonkenkanalen voorgesteld [80] dat helemaal geen gebruik maakt van details van de extra foto-ionisatie, maar alleen van de simpele continuumbenadering van de drie basismechanismen: botsingsionisatie, drift van geladen deeltjes en ruimteladingseffecten. De plaatjes in figuur 8 vertonen lijnen van gelijke elektronendichtheid gedurende de vertakking.

figuur 8



Waar ligt het verschil met het concept van Raether? Het belangrijkste verschil ligt in de verdeling van de ruimtelading. Als een lawine net ruimteladingseffecten begint te vertonen en een kanaal gaat vormen, dan vertonen onze simulaties een ruimteladingsverdeling in een heel volume vergelijkbaar met Raethers plaatje; zie de linker afbeelding in figuur 9 met bovenaan een negatieve en onderaan een positieve ruimtelading, de zwarte lijnen zijn lijnen van gelijk elektrisch potentiaal.



figuur 9

Maar daarbij blijft het niet. De ruimteladingseffecten worden sterker en de lading zit niet meer verspreid in een heel volume, maar begint zich toenemend in een dun laagje te concentreren, zie de middelste afbeelding in figuur 9. Dit is ook in eerdere simulaties al aangetoond. (Laat me even opmerken dat de experimenten deze inwendige structuur van het kanaal nog niet kunnen oplossen; daarvoor is de resolutie nog niet hoog genoeg. Maar misschien kunnen we hier wel greep op krijgen door de gasdruk te verlagen en gebruik te maken van wetten van gelijkvormigheid.)

Stel dat je de simulatie nu in een voldoende groot elektrisch veld draait (waarbij ik aanneem dat de simulatie de uitdagingen van de ontstane steile dichtheidsgradiënten aankan, wat we door lokale roosterverfijning bereiken, in samenwerking met numeriek deskundige collega's aan het Centrum voor Wiskunde en Informatica in Amsterdam). Dan zie je eerst hoe het elektrische afscherm laagje steeds dunner wordt in verhouding met de breedte van het kanaal. En op een gegeven moment gaat het kanaalkopje zich splitsen, zoals in de rechter figuur. Zo maar, zonder enige toevallige lawines, in een volledig deterministisch model. Kan dat? Kan een convexe kanaalkop zo maar concaaf worden? Is dat fysisch? Wat zit er achter?

Nou, het plasma in het kanaal is op dat moment behoorlijk goed



geleidend, dus het veld is vrij goed afgeschermd, oftewel het elektrische potentiaal verandert weinig binnen het kanaal. De elektrisch geladen randlaag tussen geleidend en niet-geleidend medium verplaatst zich afhankelijk van het lokale elektrische veld. En het elektrische veld wordt bepaald door de positie van de randlaag met zijn lading, de potentialen op de elektrodes en de oplossing van de Laplace-vergelijking $\Delta^2\varphi=0$ voor het elektrische potentiaal φ in het ladingsvrije gebied daartussen. Soortgelijke problemen met bewegende randen tussen twee toestanden, waarbij de ene toestand door de Laplace-vergelijking beschreven wordt, komen we ook in andere natuurkundige problemen tegen, bijvoorbeeld bij de stroming van twee vloeistoffen met verschillende viscositeit. Om te zien of zo'n model een spontane vertakking van een geleidend kanaal überhaupt toelaat, hebben we zogenoemde conformal mapping methodes toegepast. Daarmee kan het vereenvoudigde model vrijwel volledig analytisch opgelost worden, en zijn we dus onafhankelijk van eventuele numerieke fouten [13].

Hier is een kijkje op de wiskundige resultaten:

figuur 10

Probleem: Ideaal geleidend kanaal,
 diens rand verschuift met snelheid $\mathbf{v} = -c\mathbf{E}$
 in een veld \mathbf{E} met $\mathbf{E} = -\nabla\Phi$, $\nabla^2\Phi = 0$.
 Het veld wordt ver van het kanaal constant: $\mathbf{E} = E_0 \hat{x}$.

2D vlak $(x, y) \rightarrow$ complexe vlak $z = x + iy$.

Voor iedere N vinden we exacte oplossingen

$$z(\alpha, t) = \sum_{k=1}^N a_k(t) e^{ik\alpha}, \quad \alpha \in [0, 2\pi],$$

waarbij de $\{a_k(t)\}$ voldoen aan gewone niet-lineaire differentiaalvergelijkingen:

$$\partial_t \begin{pmatrix} a_{-1} \\ a_0(t) \\ a_1(t) \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1}(\{a_k(t)\}) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2E_0 c a_{-1}(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Maar dat hoeft u niet te kunnen lezen, want ik kan zo'n analytisch resultaat ook in een reeks voorbeeld-plaatjes laten zien:



figuur 11

Bij zijn groei wordt het kanaal aan de voorkant vlakker en stulpt in; het kanaal heeft zich spontaan vertakt.

Uit dit resultaat kunnen we concluderen, dat ook de vertakkingen in onze simulaties uit dezelfde instabiliteit voortkomen en dus fysisch zijn. (En ik wil u er even op wijzen, dat dit nu een leuk voorbeeld is van de eerder genoemde complementariteit van potlood en computer.)

Met onze fysisch begrepen numerieke resultaten kunnen we nu twee kanten op: aan de ene kant kunnen we proberen het vertakken van ontladingskanaaltjes kwantitatief te voorspellen en aan de eerder genoemde experimenten toetsen. Aan de andere kant kunnen we erover nadenken of er uit de numerieke experimenten eenvoudige regels af te leiden zijn wanneer een kanaal zich vertakt. Kan er bijvoorbeeld alleen een vertakking ontstaan als het elektrische veld voor de kanaalkop voldoende hoog en tegelijkertijd het afschermlaagje voldoende dun is? Een korte schets van het elektrostatische probleem laat zien, dat deze situatie om een zekere hoeveelheid lading in de kanaalkop vraagt. Maar lading is behouden en moet er dus naartoe stromen. Je kunt je daarom afvragen, of je door een schatting van het ladingstransport in het geleidend kanaal tot een voorspelling van de vertakkinginstabiliteit kunt komen. Allebei de paden zullen we bewandelen.



Dames en heren, ik hoop dat ik u enige kijk op vraagstellingen en methodes heb kunnen geven. Ik ben blij om in zo'n boeiend gebied te mogen werken. Ik ben ervan overtuigd, dat de samenwerking van de uitstekende plasma-experimentele groepen hier in Eindhoven met mijn analytisch-numerieke groep aan het Centrum voor Wiskunde en Informatica in Amsterdam tot een behoorlijke vernieuwing van ons begrip van de dynamische processen in niet-evenwichts-plasma's kan leiden.

Vanuit het oogpunt van mijn benoeming op het gebied van de niet-lineaire dynamica en spontane patroonvorming liggen hier veel open vragen. Maar ook de recente vraag om een beter begrip van plasma-evolutie ver van evenwicht en/of op korte tijdschalen en/of bij atmosferische druk maken zo'n onderzoek urgent. Hier gaat het niet alleen om elektrische doorslag, maar ook om andere patroonvormende processen, zoals spontane filamentatie van homogene plasma's, bijvoorbeeld in de strepen, hexagons et cetera, die ik in het begin heb laten zien of om stationaire problemen met dynamisch bepaalde randen tussen plasma en niet-geïoniseerde materie. De problemen zijn van fundamenteel natuurkundig karakter, maar hebben ook tal van toepassingen: het maken van speciale lampen en lasers, het manipuleren van scheikundige processen in gassen en aan oppervlaktes, plasma-etsen, bio-medische toepassingen.

Bij het voorbereiden van deze rede heb ik gebladerd in de redes die Richard van de Sande hier afgelopen jaar en Gerrit Kroesen twee jaar geleden gehouden heeft over de uitdagingen in de niet-evenwichts-plasma-fysica en met name over haar toepassingen. Die uitdagingen zijn zo prachtig samengevat, dat ik hier verder niets aan wens toe te voegen. Ik zou zeggen: blader ook nog eens na.

Laten we nadenken over onderzoek dat voortkomt uit mijn verhaal van vandaag over 'vonken'.

Als we op een gegeven moment de vonkjes en hun groeien en vertakken begrepen hebben, zullen we zeker over bliksems nadenken. De literatuur lijkt voor de opschaling van een lawine naar onze vonkenkanalen en

van daar verder naar de grootschalige bliksem superpositie-principes aan te halen: vele lawines maken een vonkenkanaal (denk nog eens aan Raethers historische plaatjes, die ik eerder heb laten zien), en vele vonkenkanalen maken een bliksemkanaal. Maar zo'n superpositie is een lineair concept, dat op deze niet-lineaire verschijnselen absoluut niet toepasbaar is. Voor de vonken heb ik dat vandaag laten zien.

Hoe moet je dan verder opschalen van de vonken naar de bliksem tussen wolk en aarde? Ik ben ervan overtuigd, dat er soortgelijke mechanismes aan het werk zijn als ik vandaag uitgelegd heb, ervan afgezien dat dan lokale verhitting en recombinatie van ladingsdragers meegenomen moeten worden.

Waarom wil je bliksem begrijpen? Je kunt het doen uit praktische overwegingen, bijvoorbeeld omdat je dan met een laserkanon de ontlading op een zelf gekozen plek kunt opwekken om kwetsbare voorzieningen in de buurt te ontzien. Maar je kunt het ook doen, omdat je gewoon de wens hebt om het fenomeen te begrijpen. De sterrenkunde profiteert er in grote mate van, dat het vak publiek trekt. Bliksems doen dat ook, zoals ik zelf sinds afgelopen jaar voldoende ondervonden heb.

Ik hoop dat het me gelukt is met deze voorbeelden aan te tonen hoe fundamentele en toegepaste vraagstellingen en analytisch, numeriek en experimenteel werk in elkaar grijpen, en hoeveel leuk werk er nog op ons ligt te wachten.

Dankwoord

Dames en heren, het wordt tijd om te bedanken.

Voor een chronologische volgorde moet ik beginnen bij mijn moeder, die bijvoorbeeld mijn vraag probeerde uit te leggen, waarom de maan nou aan de hemel bleef hangen en niet naar beneden stortte; ik was toen vijf. Mutti, vielen Dank und schön dass Du heute hier bist. Mögest Du noch lang so aktiv sein wie jetzt.

De uitdagingen van de ingenieurswetenschappen, met name bij de bouw van energiecentrales, heb ik via mijn vader leren kennen.

De spanning tussen fundamentele natuurkunde en toegepaste ingenieurswetenschappen is vaak onderwerp van discussie tussen ons geweest, en hij had me het liefst hogespanningselektrotechniek zien studeren. Nu vraag ik me vaak af, wat hij over mijn huidige onderzoek gezegd zou hebben, als hij er nog was.

Meisjes lijken vaker last van gebrekkig zelfvertrouwen te hebben dan jongens, wat hun studiesuccessen ernstig kan belemmeren. Gelukkig heeft mijn opname in de Studienstiftung des deutschen Volkes in het begin van mijn studie hier voor een krachtig tegenwicht gezorgd, en ik wil de hoogleraren bedanken die zich daar toen voor hebben ingezet. Ik wil ook de leraren en hoogleraren bedanken die me gedurende mijn school- en studietijd gemotiveerd en geïnspireerd hebben.

Van mijn promotiebegeleider Lothar Schäfer heb ik veel geleerd over zuivere natuurkundige redenering en analyse en systematische rekentechniek.

Wim van Saarloos wil ik bedanken voor de mogelijkheid om in Leiden als postdoc aan volstrekt nieuwe onderwerpen te beginnen, voor zijn ondersteuning daarbij, en voor mijn introductie in zijn persoonlijke en in de Nederlandse manier van wetenschap-doen. Hans van Duijn, Jan Verwer en Gerard von Oortmerssen hebben me het Centrum voor Wiskunde en Informatica binnengehaald en benoemd tot themaleider. Hier ook een algemene dank aan mijn CWI-collega's voor het prettige werkklimaat.

Ik ben ook dank verschuldigd aan de stichting FOM, die mijn



benoeming tot hoogleraar natuurkunde financieel mogelijk gemaakt heeft, en aan de faculteit Technische Natuurkunde van de TU/e, die me tot hoogleraar benoemd heeft. Dank ook aan Marnix van der Wiel en de onderzoeksschool Centrum voor plasmafysica en stralingstechnologie; hierdoor is mijn contact met de TU/e verstevigd.

In mijn dagelijks wetenschappelijk leven in Amsterdam geniet ik van de numerieke kennis en doeltreffende samenwerking met Willem Hundsdorfer. It's a pleasure to work with PhD students with so different personalities, talents and specialisations like Danijela Sijacic, Carolynne Montijn and Bernard Meulenbroek. Together with the more experienced post-doctoral researchers Andrea Rocco and Ismail Rafatov, this makes a great team for our analytical and numerical investigations.

Beste Eddie van Veldhuizen, Gerrit Kroesen, Mark Bowden, Winfred Stoffels, Eva Stoffels, Richard van de Sanden en Daan Schram, het is erg interessant om steeds meer van jullie experimentele aanpak en ervaring met ontladingen en plasma's te leren en die met mijn theoretische invalshoek te confronteren. Laten we hopen, dat we nu ook een stevige financiële steun voor gemeenschappelijke projecten kunnen vinden.

Last, but not least, lieber Lothar, danke für Rat, Verständnis und Ausgeglichenheit, wenn ich gestresst bin oder mir was auf die Seele geschlagen ist, und danke auch für die Sorge um mein leibliches Wohlergehen in Deinem wochenendlichen Küchen-Refugium.

Dames en heren, bedankt voor uw aanwezigheid en aandacht vandaag. Laten we nu naar de borrel gaan.

Ik heb gezegd.

Literatuurlijst



- 1 U. Ebert, M. Arrayás, N. Temme, B. Sommeijer, J. Huisman, *Bull. Math. Biol.* 63, 1095-1124 (2001).
- 2 D. Sijacic, U. Ebert, *Phys. Rev. E* 66, 066410 (2002).
- 3 zie bijvoorbeeld: U. Ebert, *J. Stat. Phys.* 82, 183-265 (1996);
U. Ebert, L. Schäfer, A. Baumgärtner, *Phys. Rev. Lett.* 78, 1592-1595 (1997).
- 4 M.C. Cross, P.C. Hohenberg, *Rev. Mod. Phys.* 65, 851 (1992).
- 5 Yu. Astrov, E. Ammelt, S. Teperick, H.-G. Purwins, *Phys. Lett. A* 211, 184 (1996).
- 6 Yu. Astrov, I. Müller, E. Ammelt, H.-G. Purwins, *Phys. Rev. Lett.* 80, 5341 (1998).
- 7 U. Ebert, W. van Saarloos, *Phys. Rev. Lett.* 80, 1650-1653 (1998); *Physica D* 146, 1-99 (2000).
- 8 J.M. Meek, J.D. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*, Clarendon, Oxford, 1953.
- 9 E.M. van Veldhuizen, W.R. Rutgers, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, 2169 (2002).
- 10 H. Raether, *Z. Phys.* 112, 464 (1939) [in German].
- 11 L. Niemeyer, L. Pietronero, H.J. Wiesman, *Phys. Rev. Lett.* 52, 1033 (1984); L. Niemeyer, L. Ullrich, N. Wiegart, *IEEE Trans. El. Insul.* 24, 399 (1989).
- 12 M. Arrayás, U. Ebert, W. Hundsdorfer, *Phys. Rev. Lett.* 88, 174502 (2002); A. Rocco, U. Ebert, W. Hundsdorfer, *Phys. Rev. E* 66, 035102 (2002).
- 13 B. Meulenbroek, A. Rocco, U. Ebert, preprint <http://arxiv.org/abs/physics/0305112>

Voor meer informatie en recent onderzoek, zie <http://homepages.cwi.nl/~ebert>

Curriculum Vitae

Prof.dr. U.M. Ebert is per 1 maart 2002 benoemd aan de faculteit Technische natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven als parttime hoogleraar op het gebied van niet-lineaire dynamica en patroonvorming.

Ute Ebert (1961) studeerde natuurkunde aan de Universiteit Heidelberg. Na een jaar aan de Universiteit Jeruzalem promoveerde ze aan de Universiteit Essen op renormalisatiegroep-methodes voor de polymeerdynamica. Daarna werd ze postdoc aan de Universiteit Leiden, waar ze niet-lineaire dynamica bestudeerde, met name de wis- en natuurkundige eigenschappen van propagerende 'pulled' fronten en de patroonvorming in elektrische ontladingen. In Leiden werkte ze ook aan polymeerreplicatie.

In september 1998 trad ze in dienst van het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), een NWO-instituut in Amsterdam, waar ze sinds 1 januari 2002 het thema MAS3 'Nonlinear Dynamics and Complex Systems' leidt. Het onderzoek van haar en haar groep concentreert zich nu vooral op patroonvorming in elektrische ontladingen.

Colofon

Productie:
Communicatie Service Centrum TU/e

Fotografie cover:
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:
Plaza ontwerpers, Eindhoven

Druk:
Drukkerij Lecturis, Eindhoven

ISBN: 90-386-1063-7

Digitale versie: www.tue.nl/bib/