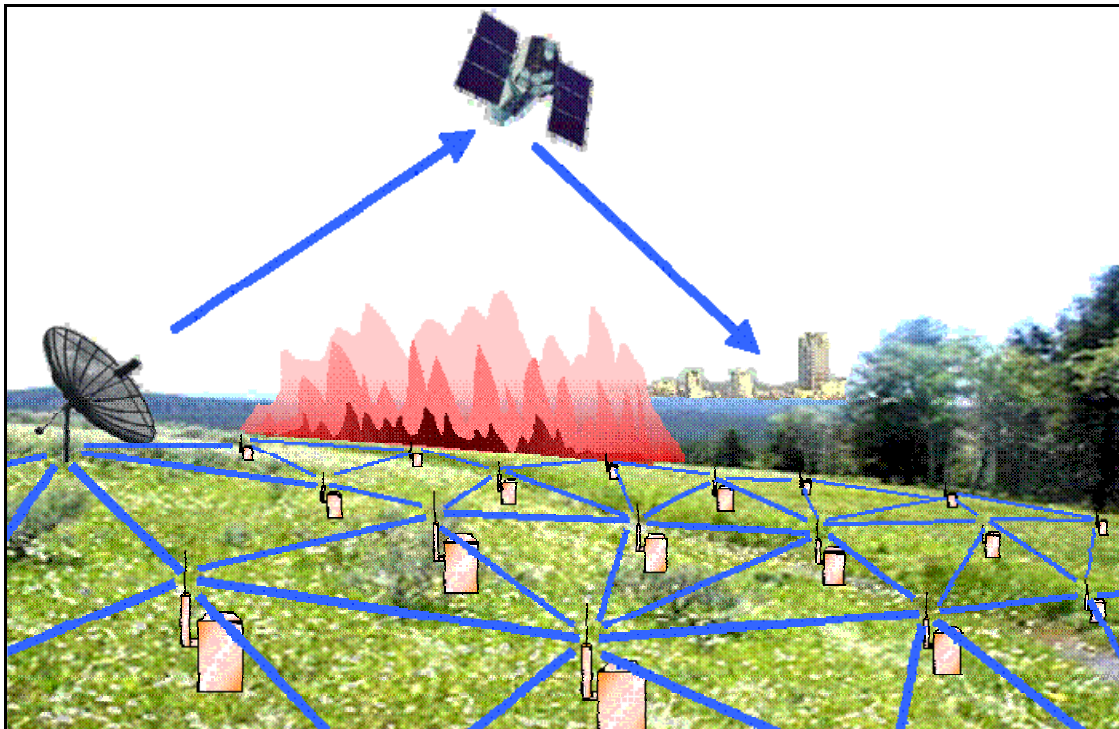


DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

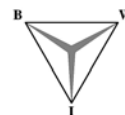
een overzicht van relevante issues m.b.t. sensornetwerken op hun weg naar succes

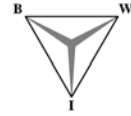


Naam student:	Maarten van den Beld
Aard:	Werkstuk
Studie:	Business Mathematics & Informatics
Instelling:	Vrije Universiteit Amsterdam
Periode:	September 2007 - April 2008
Begeleider VU:	Rob van der Mei

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08





Voorwoord

In de laatste fase van het Master programma van de studie Bedrijfswiskunde en Informatica (BWI) aan de Vrije Universiteit te Amsterdam (NL) staat het BWI-werkstuk centraal waarin op zijn minst twee van de drie facetten van de studie BWI aan de orde moeten komen. De studie bestaat uit de volgende drie facetten: bedrijfseconomie, wiskunde en informatica.

Gedurende een periode van een aantal maanden heb ik naast mijn fulltime werkzaamheden bij het bedrijf CHESS te Haarlem, gewerkt aan het werkstuk 'De opmars van sensornetwerken' een overzicht van relevante issues m.b.t. sensornetwerken op hun weg naar succes.

In dit document is het werkstuk vastgelegd.

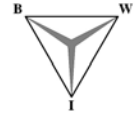
Ik wil graag mijn dank uitspreken aan Prof. Dr. Rob van der Mei die mij namens de Vrije Universiteit heeft begeleid bij dit werkstuk. Ook gaat speciale dank uit naar mijn vriendin Annette Capelle en studiegenoot en goede vriend Korik Alons die mij beide positief hebben gestimuleerd bij het totstandkomingproces van dit werkstuk. Als laatste wil ik mijn ouders bedanken die mijn studie mogelijk hebben gemaakt en vol vertrouwen, met nog meer geduld op dit studieafronde werkstuk hebben gewacht.

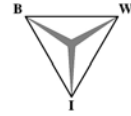
Ik wens u veel leesplezier toe!

Maarten van den Beld

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08





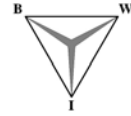
Management samenvatting

In technische zin lijken we de 'science fiction' met sensornetwerken voorbij. Er zijn de afgelopen jaren zoveel mogelijkheden ontstaan door de continue succesvolle uitvoering van wetenschappelijk onderzoek dat de aandacht voor sensornetwerk technologie alleen maar toe zal gaan nemen in de toekomst.

In dit verslag is op een beschouwende manier ingegaan op de achtergronden van en de relevante onderzoeksissues bij de opkomende sensornetwerk technologie. Wat staat de maatschappelijke integratie van sensornetwerken momenteel nog in de weg? Dat is de vraag die is beantwoord. Ondanks dat er nog veel wetenschappelijk onderzoek moet worden gedaan alvorens sensornetwerken op alle onderzoeksfronten de status van volmaakt zouden kunnen benaderen, is de techniek inmiddels rijp genoeg om een groeiend aantal eenvoudige sensornetwerk toepassingen uit te rollen.

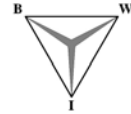
Afhankelijk van de complexiteit van de gewenste toepassingen zullen meer of minder geavanceerde technieken moeten worden gebruikt en worden ontwikkeld met het daarbij behorende prijskaartje. Afhankelijk van de gewenste onzichtbaarheid van toepassingen zullen kleinere of grotere sensoren en processoren moeten worden gebruikt of worden ontwikkeld met eveneens het daarbij behorende prijskaartje. Afhankelijk van de doelen van de gewenste toepassingen zullen vaker of minder vaak discussies moeten worden gevoerd over privacy- en veiligheidskwesties. Maar eigenlijk lijkt niks nog onmogelijk...

De wetenschap gaat dan ook onverminderd door met onderzoek ten bate van de sensornetwerk technologie. Hierdoor wordt in de nabije en verre toekomst dus nog veel meer mogelijk met sensornetwerken dan nu denkbaar en zichtbaar is. De grootste horde



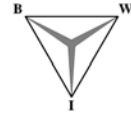
die vervolgens nog moet worden genomen is de acceptatie van de intrede van sensornetwerken in de samenleving. Pas dan staat niks de sensornetwerk technologie echt meer in de weg. Hiervoor is het allereerst nodig dat de samenleving gerust wordt gesteld door bevredigende onderzoeksresultaten op het gebied van veiligheid en privacy. Moet ten tweede de politiek hun vertrouwen in de maatschappelijke toepassingen van sensornetwerken overbrengen naar de maatschappij. En ten derde moeten succesvolle toepassingen van sensornetwerken ook laten zien wat de kracht ervan kan zijn voor het leven op aarde. Ze moeten zich voor de maatschappij bewijzen.

Ook al zijn sensornetwerken tevens te gebruiken bij oorlogsvoering en is de ontwikkeling ervan ooit begonnen bij defensie, het hogere doel moet zijn dat sensornetwerken de mens voordeel gaan opleveren. De toekomst zal het leren, maar de voortekenen zijn uitstekend te noemen.

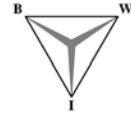


Inhoudsopgave

VOORWOORD	3
MANAGEMENT SAMENVATTING	5
INHOUDSOPGAVE	7
LIJST MET FIGUREN	9
LIJST MET TABELLEN	11
LEESWIJZER	13
1. INLEIDING	15
2. ONDERZOEKSVRAGEN	17
3. SENSORNETWERKEN	19
3.1 Geschiedenis	19
3.2 Smart Dust	21
3.3 Toepassingsgebieden	23
3.4 Sensoren in beeld	26
4. VOORBEELDTOEPASSINGEN VAN SENSORNETWERKEN	29
4.1 Lofar	30
4.2 Monitoren vulkaanuitbarsting	34
4.3 Sensiplant	37
5. ISSUES MET BETREKKING TOT SENSORNETWERKEN	41
5.1 Hardware ontwikkeling	41
5.2 Veiligheid	44
5.3 Privacy	47
5.4 Energiebeheer	48
5.5 Topologie en dekking	51



5.6 Lokaliseren	53
5.7 Kosten	56
6. DE TOEKOMST VAN SENSORNETWERKEN	59
6.1 Nabije toekomst.....	59
6.2 Verre toekomst	60
6.3 'Pervasive Computing'	61
7. CONCLUSIES.....	63
REFERENTIES.....	69
Artikelen.....	69
Websites.....	72

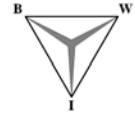


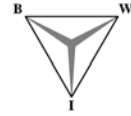
Lijst met figuren

Figuur 1: Uitvergroting van 'Smart Dust' sensor met details	22
Figuur 2: Sensor net groter dan munt (L), sensor met Solar panelen (R).....	26
Figuur 3: Een bovenaanzicht en dwarsdoorsnede van een multifunctionele sensor	27
Figuur 4: De LOFAR radiotelescoop in Noord-Nederland.....	31
Figuur 5: Schematisch overzicht van sensoren op Tungurahua vulkaan in Ecuador	35
Figuur 6: Draadloze seismische en akoestische sensor (L), Tungurahua (R)	37
Figuur 7: Illustratie van werking Sensiplant (L), uitvergroting sensor (R).....	39
Figuur 8: De Wet van Moore en het verwachte einde van de wet (rood).....	42
Figuur 9: Verschil tussen groeicurve van Moore en huidige inzicht.....	43
Figuur 10: Verschillende voorbeelden van een netwerktopologie.....	52
Figuur 11: Berekende contouren van locatiegebied zichtbare sensoren	55
Figuur 12: Kosten sensorontwikkeling per sensor (L), trend kosten per sensor (R)	57

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08



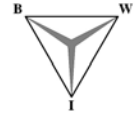


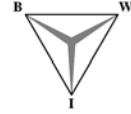
Lijst met tabellen

Tabel 1: Drie generaties van sensoren21

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08



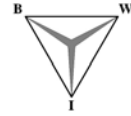


Leeswijzer

Deze leeswijzer is bedoeld om de lezer van dit werkstuk een overzicht te geven van en bekend te maken met de zaken die in dit document zijn beschreven. Per onderdeel van het document wordt in het kort de kern beschreven.

In dit document zijn achtereenvolgens de volgende zaken te lezen:

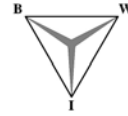
- Inleiding (H1)
Bevat een korte introductie van het onderwerp van dit werkstuk: 'Sensornetwerken'.
- Onderzoeksvragen (H2)
Beschrijft de hoofdonderzoeksvraag voor dit werkstuk. Beschrijft verder de subonderzoeksvragen die als gevolg van de brede hoofdonderzoeksvraag dienen te worden beantwoord.
- Sensornetwerken (H3)
Gaat in op de geschiedenis van sensornetwerken. Gaat tevens in op de ontwikkeling van sensornetwerken door de jaren heen, tot nu. Geeft nadere achtergrondinformatie met betrekking tot sensornetwerken.
- Voorbeeldtoepassingen van sensornetwerken (H4)
Behandelt verschillende recent ontwikkelde succesvolle toepassingen waarin sensornetwerken centraal staan.



- Issues met betrekking tot sensornetwerken (H5)
Behandelt een greep uit de issues die momenteel spelen in het onderzoek naar sensornetwerken, op basis van wat er in de wetenschappelijke literatuur over geschreven is.
- Toekomst van sensornetwerken (H6)
Beschouwt de nabije en verre toekomst van sensornetwerken.
- Conclusies (H7)
Beschrijft de conclusies die getrokken kunnen worden op basis van het literatuuronderzoek in dit werkstuk. Koppelt de bevindingen terug naar de hoofdonderzoeksvraag. Geeft tevens een overzicht van de issues die als onderwerp voor verder onderzoek kunnen worden gebruikt.

Tevens is er een referentielijst toegevoegd van de artikelen, boeken en websites die voor dit werkstuk zijn geraadpleegd.

Het komt voor dat figuren die ter illustratie zijn gebruikt, ondanks dat dit werkstuk in het Nederlands geschreven is, voorzien zijn van Engelse bijschriften of titels. Omdat de vanaf het Internet afkomstige figuren ook in het Engels het gewenste doel dienen vond de auteur het niet nodig om de betreffende figuren vertaald opnieuw te maken.



1. Inleiding

Sensornetwerken zijn al dan niet draadloze netwerken bestaande uit een veelvoud van autonoom opererende apparaatjes die met behulp van sensoren samenwerken om bepaalde omgevingsfactoren te monitoren voor verschillende locaties. Het gaat hier bijvoorbeeld om de omgevingsfactoren temperatuur, geluid, trillingen, druk en beweging. Met behulp van de gemonitoorde gegevens kunnen conclusies worden getrokken over of acties worden ondernomen op datgene waarop het sensornetwerk betrekking heeft.

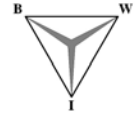
Sensornetwerken zijn een relatief nieuw vakgebied binnen de computerwereld. Toch zijn sensornetwerken inmiddels veelbesproken en onderwerp van menig wetenschappelijk onderzoek omdat de beoogde toepassingen ervan verstrekkende gevolgen kunnen gaan hebben voor het toekomstige leven op aarde. Voordat het zover is zijn er gelukkig nog flink wat hordes te nemen, zowel op technisch vlak als op ethisch vlak.

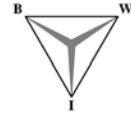
In dit verslag is getracht om op heldere wijze uiteen te zetten wat de huidige stand van zaken is in het onderzoek naar de technische en praktische ontwikkeling van sensornetwerken. Ook is er zijdelings stilgestaan bij het ethische vraagstuk rondom sensornetwerken. Voor de bewerkstelling hiervan is in Hoofdstuk 2 een onderzoeksvraag beschreven waarop getracht is een antwoord te vinden met behulp van een literatuuronderzoek naar de relevante issues met betrekking tot sensornetwerken. Dit literatuuronderzoek is beschreven in Hoofdstuk 5. In Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4 is voor een betere beeldvorming van sensornetwerken verder ingegaan op de achtergrond en huidige toepassingen ervan.

Bron: [1-W]

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08





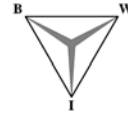
2. Onderzoeksvragen

Zoals in de inleiding reeds is genoemd, is er in dit werkstuk getracht om antwoord te geven op een hoofdonderzoeksvraag. Deze onderzoeksvraag is voornamelijk gericht op de informatie technologische kant en de wiskundige kant van sensornetwerken (het I-facet en het M-facet van de studie BMI).

- “Welke issues staan de mogelijkheden van sensornetwerken momenteel nog in de weg in de verschillende onderzoeksgebieden, alvorens sensornetwerken niet meer weg te denken zijn uit de maatschappij?” (§5.1 t/m §5.7)

Specifieker richt de hoofdonderzoeksvraag zich op zeven onderzoeksgebieden met betrekking tot sensornetwerken. Derhalve is de hoofdonderzoeksvraag ook in zeven specifiekere onderzoeksvragen gesplitst. De volgorde van de vragen is de volgorde waarin ze in dit verslag aan bod komen.

- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van hardware in sensornetwerken?” (§5.1)
- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van veiligheid in sensornetwerken?” (§5.2)
- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van privacy in sensornetwerken?” (§5.3)
- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van energiebeheer in sensornetwerken?” (§5.4)

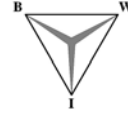


- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van topologie en dekking in sensornetwerken?” (§5.5)
- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van lokaliseren in sensornetwerken?” (§5.6)
- “Welke relevante issues zijn er op het gebied van kosten in sensornetwerken?” (§5.7)

Om een goed algemeen beeld te vormen bij sensornetwerken is tevens op de hieronder volgende vragen getracht antwoord te geven. De vragen zijn gericht op de geschiedenis, de huidige toepassingen en de toekomst van sensornetwerken. Alle drie de vragen gaan indirect in op de mogelijke bedrijfseconomische gevolgen van de toepassing van sensornetwerken in de huidige en toekomstige maatschappij (het B-facet van de studie BMI).

- “Wat is de ontstaansgeschiedenis en de verdere achtergrond van sensornetwerken?” (§3.1 t/m §3.4)
- “Wat zijn de huidige toepassingen van sensornetwerken?” (§4.1 t/m §4.3)
- “Wat kunnen we in de nabije en verre toekomst verwachten van de in opmars zijnde sensornetwerken?” (§6.1 t/m §6.3)

Door het op een beschouwende manier beschrijven van de zoektocht naar de antwoorden op bovenstaande onderzoeksvragen wordt in dit werkstuk een zo volledig mogelijk beeld neergezet van de huidige issues rondom sensornetwerken.



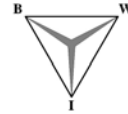
3. Sensornetwerken

3.1 Geschiedenis

De ontwikkeling van sensornetwerken komt oorspronkelijk voort uit de samensmelting van technologieën uit drie verschillende onderzoeksgebieden: waarnemen (sensing), communicatie (communication) en berekenen (computing), waarbij onder het laatste onderzoeksgebied ook software, hardware en algoritmen vallen. Gecombineerde en opzichzelfstaande ontwikkelingen in de drie onderzoeksgebieden waren de drijfveer voor het onderzoek naar sensornetwerken en de ontwikkeling ervan.

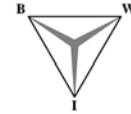
Er is geen exacte datum bekend waarop het fenomeen 'sensornetwerken' is ontstaan. Het eerste geavanceerde onderzoek naar wat we nu nog steeds sensornetwerken noemen startte rond 1980 en betrof het militaire DSN (Distributed Sensor Networks) programma in het onderzoeksbureau DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). De originele visie op sensornetwerken was om met behulp van bijna onzichtbare sensoren die via een draadloos netwerk met elkaar konden communiceren, in staat te zijn om relevante militaire zaken op afstand te kunnen monitoren. Bij het DSN onderzoek stond de originele toekomstvisie op sensornetwerken centraal, ook al wist men dat de techniek er nog lang niet rijp voor was. Minuscule sensoren waren nog ondenkbaar, draadloze communicatie was nog niet ver genoeg ontwikkeld en processoren met een laag energieverbruik waren nog nergens te vinden. Een stap in de goede richting werd desondanks gezet met de ontwikkeling van een bedraad testnetwerk met een telbaar aantal grote sensoren die data verzamelden en deze data vervolgens naar een centrale computer stuurden.

De eerste echte toepassingen van sensornetwerken werden eveneens gerealiseerd in de jaren '80. Het betrof voornamelijk militaire toepassingen uit het eerder genoemde



DSN programma. Met behulp van geluidssensoren en camera's konden bijvoorbeeld laag overvliegende vliegtuigen worden getraceerd. Moderne algoritmen konden omgaan met de vertraging van geluid om de exacte locatie en snelheid van het vliegtuig te achterhalen. Omdat er nog geen PC's of workstations bestonden zoals wij deze nu kennen, werd voor de verwerking van data uit de sensornetwerk toepassingen gebruik gemaakt van minicomputers. Omdat er tevens nog geen Internet bestond zoals wij dit nu kennen, werden signalen en data uit de sensoren doorgegeven over gesloten bedrade netwerken. Het doel was uiteindelijk om de gegevens die gemeten werden door de sensoren, direct te communiceren naar de plaatsen waar de informatie van belang was. Hier kon op basis van de sensordata actie worden ondernomen. Op het gebied van oorlogsvoering was dit een heel grote vooruitgang. Vooral omdat de samenwerking tussen sensoren de te nemen acties bepaalde. Er was dus niet één sensor voor elke afzonderlijke plaats, maar een netwerk voor alle plaatsen. Later zou duidelijk worden dat toepassingen van sensornetwerken niet alleen op militair gebied enorm veel voordeel op zouden gaan leveren maar ook op alle andere plekken in de maatschappij.

In de jaren '90 en de eerste jaren van de 21^{ste} eeuw kwam er een versnelling in de ontwikkelingen op het gebied van computers, sensoren en communicatiemiddelen. Computers kwamen in de huiskamers van vele gezinnen (PC's en laptops), sensoren werden alsmat kleiner en breder toepasbaar (MEMS: Micro ElectroMechanical Systems) en het bedrade Internet werd gemeengoed. Ook kwam, op verschillende fronten tegelijk, de draadloze communicatie en bijbehorende protocollen op: mobiele telefonie, draadloos Internet (WiFi), draadloze sensoren, RFID, Bluetooth, ZigBee. Niet meer alleen de militaire doeleinden, maar tevens de doeleinden voor de gewone mens waren nu de basis voor onderzoek en ontwikkeling van allerlei toepassingen van sensornetwerk technologie geworden.



Inmiddels leven we in het jaar 2008. Al een aantal jaren zijn er succesvolle toepassingen van draadloze sensornetwerk technologie in gebruik op uiteenlopende gebieden (zie §3.3 en §4.1 t/m §4.3). Ook breidt het onderzoek naar nog verdergaande toepassingen zich steeds verder uit. Nog altijd moet het slimmer, sneller, kleiner en energiezuiniger. Dit blijkt ook uit de onderstaande tabel, waarin een overzicht staat van de relevante kenmerken van drie generaties sensoren. De laatste generatie in deze tabel is slechts een verwachte generatie, vastgesteld op basis van de trend uit de jaren ervoor. In Hoofdstuk 6 zal worden beschouwd in hoeverre deze verwachting nog altijd valide is.

	Yesterday (1980's – 1990's)	Today (2000 – 2003)	Tomorrow (2010)
Manufacturer	Custom contractors, e.g., for TRSS	Commercial: Crossbow Technology, Inc. Sensoria Corp., Ember Corp.	Dust, Inc. and others to be formed
Size	Large shoe box and up	Pack of cards to small shoe box	Dust particle
Weight	Kilograms	Grams	Negligible
Node architecture	Separate sensing, processing and communication	Integrated sensing, processing and communication	Integrated sensing, processing and communication
Topology	Point-to-point, star	Client server, peer to peer	Peer to peer
Power supply lifetime	Large batteries; hours, days and longer	AA batteries; days to weeks	Solar; months to years
Deployment	Vehicle-placed or air-drop single sensors	Hand-emplaced	Embedded, "sprinkled" left-behind

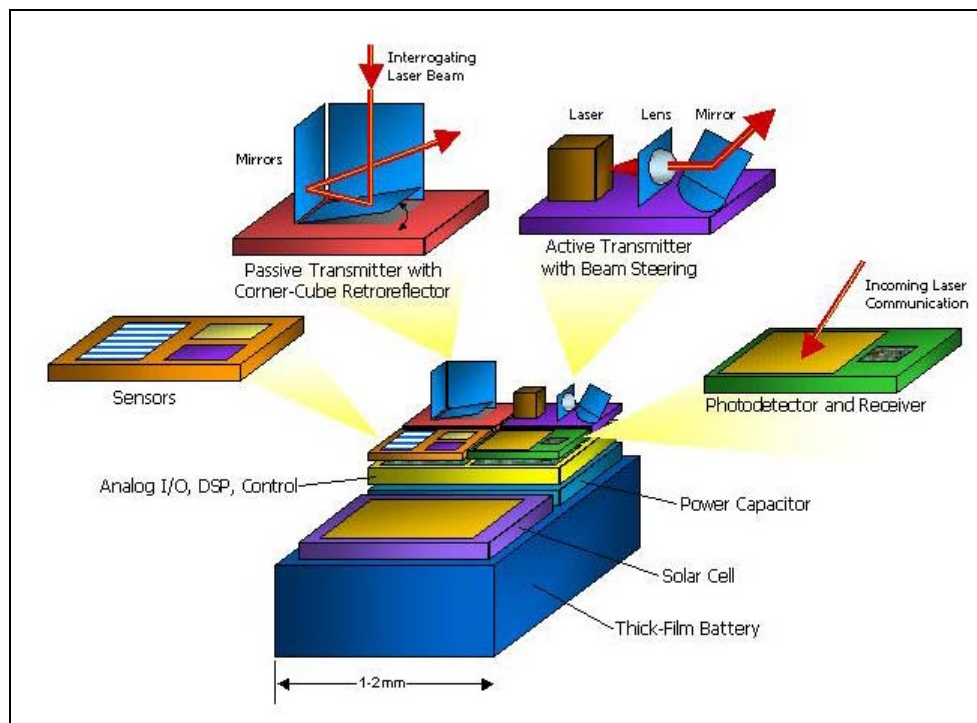
Tabel 1: Drie generaties van sensoren

Bronnen: [1-A], [2-A], [3-A]

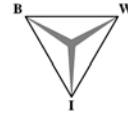
3.2 Smart Dust

Het oorspronkelijke idee van 'Smart Dust' kwam van Dr. Kris Pister van de Berkeley Universiteit in Californië. 'Smart Dust' is de term die hij in de jaren negentig gebruikte voor kleine draadloze sensoren die in een netwerk met elkaar moesten communiceren

teneinde omgevingsfactoren te kunnen monitoren. Toen de term voor het eerst viel was het vooral een toekomstbeeld van wat we nu kennen als draadloze sensornetwerk technologie. De sensoren waren toen immers nog niet zo geavanceerd dat elke gewenste omgevingsfactor kon worden gemeten. Bovendien waren de beoogde processoren op de sensoren nog veel te groot van formaat en waren er nog geen geschikte communicatiestandaarden om gewenste communicatie tot stand te brengen tussen sensoren. Omdat 'Smart Dust' in feite precies is en ermee bedoeld is wat de naam zegt dat het is, 'slim stof', moet worden geconcludeerd dat zelfs nu nog niet het beoogde toekomstbeeld van 'Smart Dust' is gerealiseerd. De sensoren zijn immers nog altijd ruimschoots groter dan stofdeeltjes. In het onderstaande figuur is te zien uit welke onderdelen een 'Smart Dust' sensor bestaat.



Figuur 1: Uitvergroting van 'Smart Dust' sensor met details



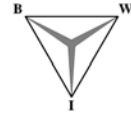
Toch is er wel al een grote slag geslagen in de realisatie van 'Smart Dust'. De gedachte erachter is inmiddels de basis van menig succesvolle draadloze sensornetwerktoepassing (zie §3.3 en §4.1 t/m §4.3) en de techniek laat inmiddels toe dat sensoren heel erg klein kunnen zijn. Er bestaat ook een kans dat bij de Amerikaanse defensie in het geheim al sensoren zijn ontwikkeld die daadwerkelijk de grootte van stofdeeltjes hebben (meer hierover in Hoofdstuk 6).

Bronnen: [4-A], [5-A]

3.3 Toepassingsgebieden

Zoals reeds genoemd vinden sensornetwerken hun oorsprong in militaire toepassingen. De defensiedoeleinden konden vanaf de jaren tachtig worden gerealiseerd omdat destijds hiervoor veel geld beschikbaar werd gesteld, zoals ook nu weer voor nog nieuwere ontwikkelingen ten behoeve van defensie. Eigenlijk is het te betreuren dat oorlogsvoering heel vaak ten grondslag ligt aan nieuwe technologische ontwikkelingen. Aan de andere kant zouden veel huidige maatschappelijke toepassingen met een militaire achtergrond nooit zijn ontwikkeld indien er niet door defensie enorme hoeveelheden geld en tijd in de ontwikkeling ervan waren gestoken.

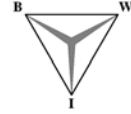
Als technologieën zich hebben bewezen bij defensie duurt het meestal niet lang meer voordat deze technologieën en hun toepassingen zich ook onder de 'normale' mensen verspreiden. Onder aanmoediging en sponsoring van het bedrijfsleven zorgt de wetenschap ervoor dat de technologie rijp wordt gemaakt voor algemeen maatschappelijk gebruik. Het bedrijfsleven profiteert uiteindelijk weer van de te halen rendementen bij slim inzetten van de technologieën in hun toepassingen.



Zo werkt het ook bij sensornetwerk technologie. Het bedrijfsleven ziet na de successen op militair vlak, toekomst in de technologie en spoort wetenschappers aan. Voor sensornetwerk technologie zijn het voornamelijk informatici en mathematici die de onderzoeken doen. Dit komt door het bijna volledige raakvlak van de sensornetwerk technologie met hun vakgebied en zal duidelijker worden in Hoofdstuk 5 als in wordt gegaan op de technische issues die spelen in het onderzoek naar sensornetwerken. Wetenschappers van andere disciplines bemoeien zich echter ook met het onderzoek indien het toepassingen van sensornetwerken betreft die op hun vakgebied slaan. Er kan dus uiteindelijk worden geconcludeerd dat het onderzoek naar sensornetwerken een multidisciplinaire aangelegenheid is.

Om een goed inzicht te krijgen in wat er met sensornetwerken zoal gemonitord kan worden en welke toepassingsgebieden er zoal zijn, is hieronder een puntsgewijze samenvatting gemaakt. De huidige sensoren en toepassingsgebieden zijn echter zo divers dat nooit een volledig overzicht kan worden gegeven. Het overzicht beperkt zich dus tot een overkoepelende greep uit de talloze mogelijkheden. Eerst de toepassingsgebieden.

- Toepassingen op militair gebied
- Toepassingen ter beveiliging van infrastructuur
- Toepassingen voor het monitoren van milieu en leefomgeving
- Toepassingen voor industrieel monitoren
- Toepassingen om verkeer te controleren en te regelen
- Toepassingen in de gezondheidszorg
- Toepassingen voor het automatiseren van het huis



Om in al deze toepassingsgebieden succesvol te kunnen zijn moeten sensornetwerken in staat zijn om de juiste omgevingsfactoren te kunnen monitoren met hun sensoren. Een greep uit de te monitoren factoren wordt hieronder opgesomd.

- Temperatuur (temperatuur sensoren)
- Trillingen (seismische sensoren)
- Geluid (akoestische sensoren)
- Luchtvochtigheid
- Grondvochtigheid
- Druk (ook luchtdruk)
- Beweging (visuele sensoren)
- Magnetische velden
- Licht (ook infrarood)
- Gassen
- Vloeistoffen

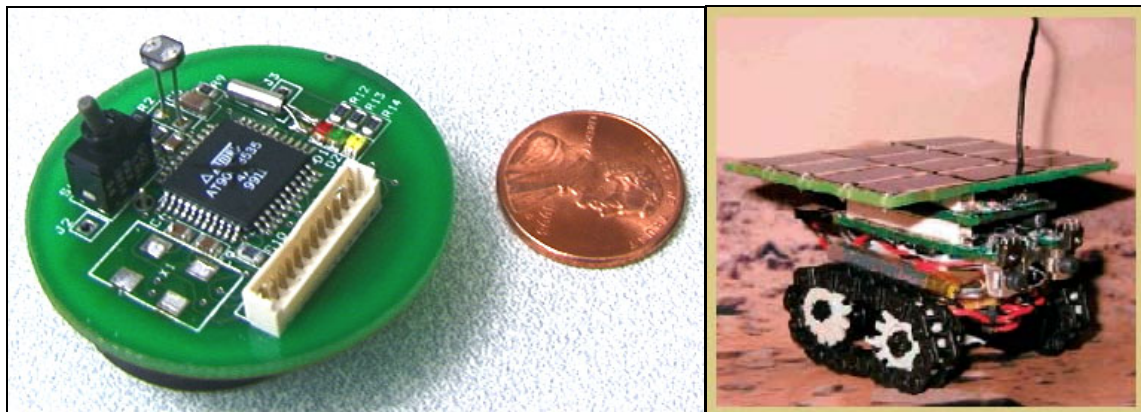
Door gebruik te maken van verschillende sensoren of diverse metingen van dezelfde sensoren kunnen interessante uitspraken worden gedaan en/of acties worden ondernomen binnen de verschillende toepassingsgebieden. Bijvoorbeeld kan de samenwerking tussen een temperatuursensor en een sensor om gassen mee vast te stellen, er voor zorgen dat alarm wordt geslagen indien de temperatuur hoger is dan het ontbrandingspunt van het vastgestelde gas. Een meer voor de hand liggend voorbeeld is de monitoring van drukte op de weg. Door meerdere druksensoren in het asfalt wordt de dichtheid van het verkeer gemeten en direct aan de rijders gecommuniceerd middels de matrixborden boven de weg dat langzamer moet worden gereden. De informatie wordt bovendien doorgespeeld naar diverse instanties die via hun websites ook de drukte kenbaar maken (ANWB, VID). Nieuwe technologische ontwikkelingen richten zich

momenteel overigens op weer een ander manier van file monitoren, gebruikmakend van mobiele telefoons van de mensen die in de file staan.

Bronnen: [1-A], [6-A]

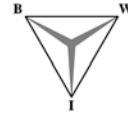
3.4 Sensoren in beeld

Door verschillende technologische ontwikkelingen in het recente verleden hebben sensoren een aanzienlijke gedaanteverwisseling doorgemaakt. Daar waar de sensoren in de tachtiger jaren nog de grootte hadden van een schoendoos en groter, hebben de sensoren momenteel de grootte van een kaartspel en kleiner (zie ook Tabel 1 in §3.1 voor de ontwikkeling in de afgelopen 30 jaar)

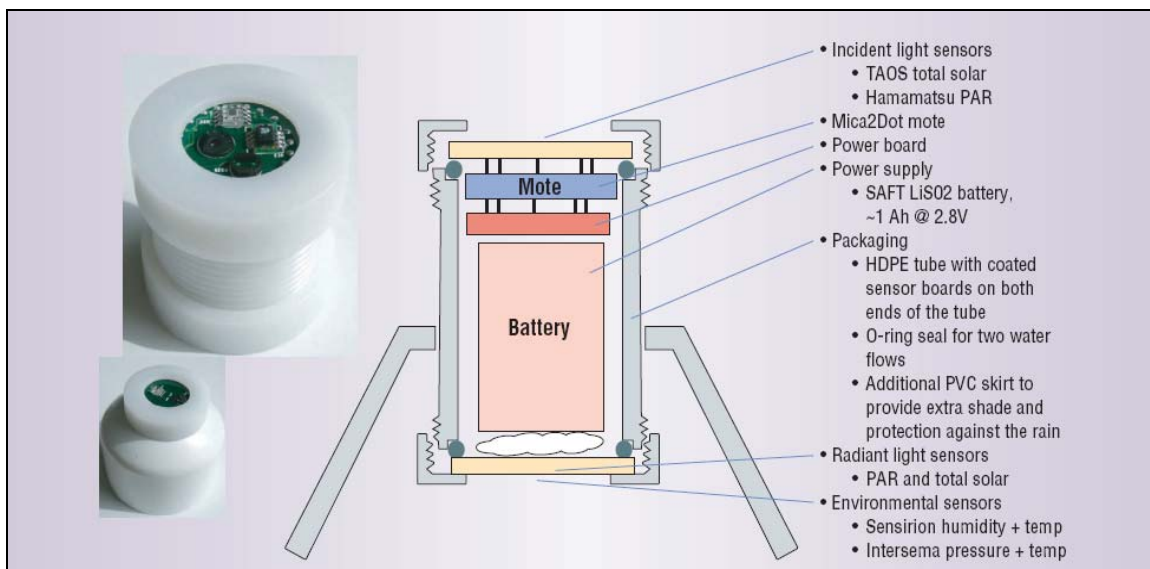


Figuur 2: Sensor net groter dan munt (L), sensor met Solar panelen (R)

De hierboven en hieronder afgebeelde sensoren zijn slechts een voorbeeld van hoe een sensor er uit kan zien. De grootte en vorm hangen volledig af van het gebruiksdoel. Een sensor zoals deze in dit werkstuk beschreven wordt is eigenlijk een sensor 'node' zoals dit in de literatuur van sensornetwerken heet. De sensor 'node' vormt een knoop in het

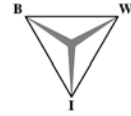


bedrade of draadloze sensornetwerk. Sensor 'nodes' kunnen uitgerust zijn met meerdere sensoren, maar ook met slechts een enkele sensor. Naast sensoren zitten er in een sensor 'node' ook vaak een batterij of een andersoortige energiebron (in bedrade netwerken kan dit ook een netvoeding zijn), een 'mote' en een draadloze ontvanger/zender. De 'mote' is de microprocessor die de communicatie met andere 'nodes' mogelijk maakt via de ontvanger/zender en bovendien de verzamelde sensordata verwerkt. De batterij zorgt ervoor dat de microprocessor, de ontvanger/zender en de sensoren hun werk kunnen doen. Omdat de 'mote' het intelligente werk verricht in de sensor 'node', wordt een sensor 'node' in zijn geheel ook wel kortweg een 'mote' genoemd.

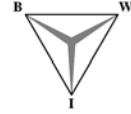


Figuur 3: Een bovenaanzicht en dwarsdoorsnede van een multifunctionele sensor

Hoe kleiner de 'mote' is, hoe verfijnder de techniek en communicatieprotocollen moeten zijn om binnen de energiegrenzen te kunnen opereren. Voor vele toepassingen is de grootte van de 'mote' niet een beperkende factor. Er zijn echter ook toepassingen en beoogde toepassingen waarvoor dit wel het geval is. Het gebruiksgemak van kleine



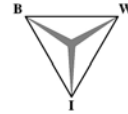
'motes' is in alle toepassingsgebieden in ieder geval een stuk hoger. Vandaar ook de continue ontwikkeling naar steeds kleiner.



4. Voorbeeldtoepassingen van sensornetwerken

Er zijn diverse toepassingen van sensornetwerken die zeer illustratief zijn voor de kracht en mogelijkheden ervan. In dit hoofdstuk is een drietal succesvolle toepassingen beschreven, die overigens nog altijd in ontwikkeling zijn. Het zijn toepassingen op uiteenlopende gebieden: van huis, tuin en keuken toepassing (Sensiplant) tot een toepassing van wereldformaat (LOFAR). De omvang van de toepassing is maatgevend voor de hoeveelheid woorden die er aan zijn gewijd in dit werkstuk. Een grotere toepassing heeft vanzelfsprekend een grotere positieve maatschappelijke impact, en vandaar dus, hier meer aandacht. Die positieve maatschappelijke impact is precies hetgeen waarom men denkt dat sensornetwerken en in het bijzonder draadloze sensornetwerken een lange toekomst tegemoet zullen gaan. De maatschappelijke kracht van de beschreven toepassingen wordt per toepassing extra duidelijk uitgelicht.

In de beschreven toepassingen is men er in geslaagd om een gecontroleerde omgeving te bewerkstelligen waarin de huidige technische en ethische stand van zaken op het gebied van de gebruikte sensornetwerken volstaan om de toepassingen succesvol te laten zijn. Voor de beoogde toepassingen waar deze gecontroleerde omgeving momenteel nog niet kan worden gecreëerd, is de wetenschap op zoek naar nieuwe technologieën die dit wel mogelijk kan maken. Op ethisch vlak moeten ook nog drempels worden genomen. Zolang de lijst met mogelijke toepassingen van sensornetwerken blijft groeien, zal de wetenschap en de politiek zich voortdurend blijven buigen over technisch en ethische vraagstukken op het gebied van sensornetwerken. De wetenschap verlangt steeds snellere algoritmen, kleinere hardware en efficiëntere energiebronnen. De politiek, en daarmee dus ook de wetenschap, moet ondertussen de privacy van de burgers waarborgen.



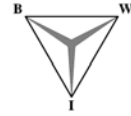
In Hoofdstuk 5 worden zowel opgeloste als openstaande technische en ethische vraagstukken op verschillende onderzoeksgebieden beschreven. Per onderzoeksgebied zal worden gekeken naar de mate waarin de huidige stand van zaken belemmerend is voor de ontwikkeling van steeds verdergaande beoogde toepassingen van de sensornetwerk technologie.

4.1 Lofar

Allereerst de beschrijving van het Nederlandse paradepaardje op het gebied van draadloze sensornetwerk technologie. Een toepassing die in zichzelf weer meerdere toepassingen in verschillende wetenschappelijke disciplines behelst...

Nederland heeft een lange traditie in de sterrenkunde en neemt wereldwijd een topositie in vanwege aansprekend onderzoek op dit terrein. In 1956 werd een belangrijke stap gezet toen het ASTRON Instituut in Dwingeloo een radiotelescoop realiseerde die wetenschappers voor het eerst in de geschiedenis in staat stelde om de structuur en omvang van onze eigen Melkweg in kaart te brengen. Een tweede grote doorbraak voor Nederland kwam begin jaren zeventig met de opening van de Westerbork telescoop, bestaande uit 14 grote gekoppelde radiotelescopen.

Ondertussen heeft de sterrenkunde alweer een nieuwe doorbraak gehad. Het is de koppeling van tienduizenden kleine sensoren (antennes) in een netwerk met een supercomputer door middel van een uitgestrekt glasvezelnetwerk. Dit netwerk vormt een reusachtige radiotelescoop met een diameter van 350 kilometer. De telescoop maakt het mogelijk het prille begin van ons heelal waar te nemen. LOFAR (Low Frequency Array) is de projectnaam waaronder deze radiotelescoop onlangs in Nederland is gerealiseerd. Initiatiefnemer van het project was opnieuw het ASTRON instituut, dat hiermee eens te



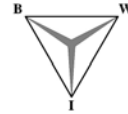
meer liet zien dat het al ruim 50 jaar vooruitstrevend opereert op het gebied van de ontwikkeling, de bouw en het beheer van sterrenkundige meetinstrumenten. Momenteel vindt de doorontwikkeling van de verschillende toepassinggebieden binnen het project plaats.



Figuur 4: De LOFAR radiotelescoop in Noord-Nederland

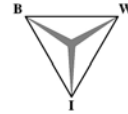
Voor de ontwikkeling van de radiotelescoop is grootschalig onderzoek op het gebied van ICT noodzakelijk geweest. Nooit eerder was immers een instrument ontwikkeld met de capaciteit voor verwerking van signalen en gegevens van deze omvang.

Uit verkenningen in een vroeg stadium van het project bleek al snel dat ook onderzoekers uit andere disciplines dan de astronomie geïnteresseerd waren in de



mogelijkheden van sensornetwerken. Omdat de LOFAR telescoop feitelijk een enorm bedraad netwerk van sensoren was, met weliswaar in eerste instantie alleen het doel de astrofysica te dienen, was het gevolg van de verregaande interesse in de sensornetwerk technologie vanuit andere disciplines, dat in het LOFAR project ook geofysici en landbouwwetenschappers gingen participeren. Binnen het oorspronkelijke LOFAR project is ten behoeve van deze wetenschappers een draadloos netwerk ontwikkeld waarin verschillende typen sensoren met elkaar werden verbonden. Een uitgestrekt ICT-netwerk zorgt voor het transport van de signalen van deze sensoren naar de centrale supercomputer, waarin de gegevens verwerkt worden. De seismische geluidssensoren in LOFAR stellen geofysici in staat de aardbodem van Noord-Nederland in kaart te brengen. Nieuwe gegevens over bodemdaling, watermanagement en gaswinning komen daarmee ter beschikking en worden continu gemonitord. Landbouwwetenschappers op hun beurt gebruiken het huidige onderzoek naar geavanceerde draadloze sensoren in het LOFAR-netwerk voor de ontwikkeling van precisielandbouw. Met het onderzoek wordt kennis ontwikkeld over efficiënt beheer van productieprocessen.

Mede door de brede toepasbaarheid van het LOFAR sensornetwerk (zowel bedraad als draadloos) en het nieuwe onderzoek naar de technische mogelijkheden van sensornetwerk technologie in het algemeen, is LOFAR een ICT-project met verstrekkende economische betekenis. Het project geeft ten eerste een belangrijke impuls aan de ICT-ontwikkeling en sensornetwerk technologie in Nederland. Het dient dus naast de eerder genoemde disciplines ook nog eens de ICT sector, zowel op wetenschappelijk gebied als in de praktijk. Grootschalige sensornetwerken ten tweede, worden bovendien internationaal gezien als misschien wel de belangrijkste ICT-ontwikkeling op dit moment. Het project zorgt dus voor veel belangstelling van buiten de landsgrenzen. LOFAR creëert daarnaast ten derde, in Noord-Nederland een innovatieve ICT-omgeving en veel werkgelegenheid.

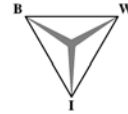


De algemene kennisontwikkeling over sensornetwerken zal in de toekomst belangrijk zijn voor bijvoorbeeld grootschalige verkeerscontrole, publieke veiligheid, milieumonitoring en defensie. Het brede economische belang blijkt ook uit de belangstelling van het bedrijfsleven voor het LOFAR-project. Bedrijven als Shell, de NAM en IBM participeren in LOFAR. En ook TNO-NITG, KNMI, IMAG, Vertis en Plant Research International en ook de waterschappen in Noord-Nederland hebben zich aan het project gecommitteerd.

Dat ook de Nederlandse overheid de wetenschappelijke en maatschappelijke kracht en relevantie ziet van het LOFAR project laat ze zien met de subsidiebijdrage van 52 miljoen euro. Dit bedrag is beschikbaar gesteld aan een consortium van universiteiten, onderzoeksinstituten en bedrijven die binnen Lofar werken. Toch is de enorme bijdrage van de overheid slechts een derde van de totale gebudgetteerde kosten van het project.

Het LOFAR project vergt zoals genoemd veel ICT-onderzoek om de verschillende onderzoeksdisciplines binnen het project te dienen. Het project is hiermee dus tevens een zeer belangrijke bron van nieuw onderzoek en nieuwe ontwikkelingen op ICT gebied. In het ICT-onderzoek bepaalt de vraag vanuit de toepassingen weliswaar de keuzes in de innovatie (de onderzoeksvragen uit de astrofysica, geofysica en landbouwtechniek zijn leidend voor de ICT-ontwikkelingen), indirect zal het onderzoek en daarmee de nieuwe inzichten echter ook bruikbaar zijn voor toepassingen buiten het LOFAR project. De belangen van onderzoeksinstituten en bedrijven garanderen de snelle verspreiding van de nieuwe kennis naar de wetenschap en het bedrijfsleven. Met het Lofar project wordt dus een zogenaamde win-win-win-win-win situatie gerealiseerd.

Bronnen: [4-W], [7-A], [8-A], [9-A], [10-A]



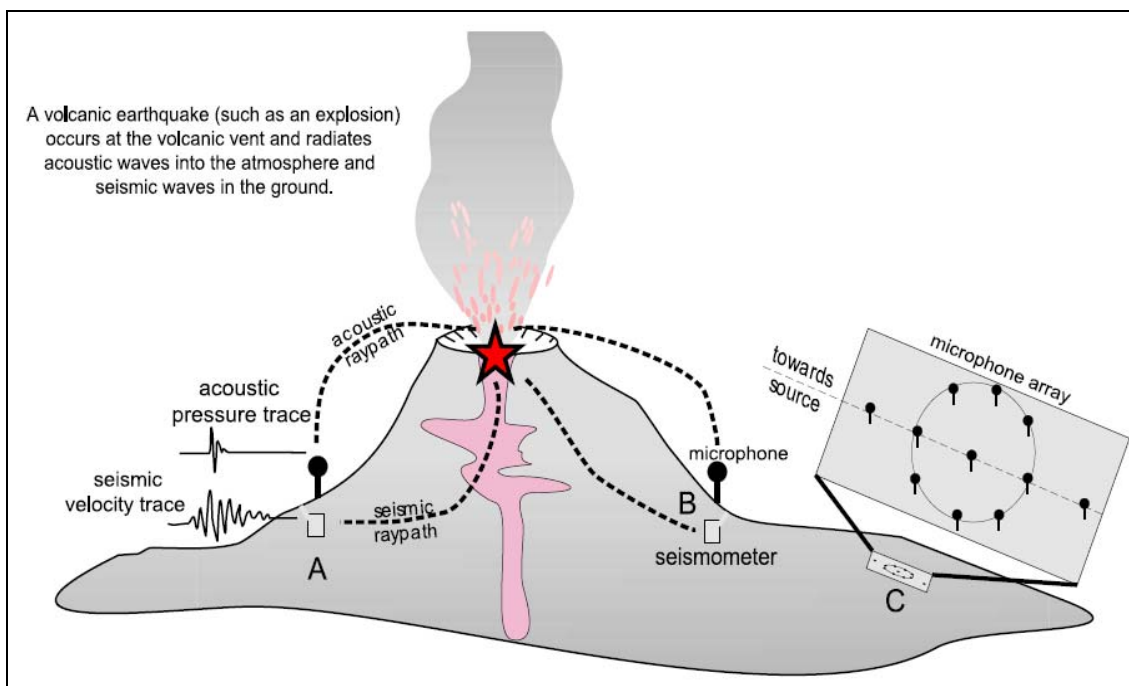
4.2 Monitoren vulkaanuitbarsting

Als tweede de beschrijving van een toepassing van draadloze sensornetwerk technologie om aan te tonen dat deze nieuwe techniek veel, tot meer perspectieven biedt ten opzichte van de traditionele meetmethoden. Zeker in de toekomst...

De Tungurahua is een ruim 5000 meter hoge actieve vulkaan in Ecuador. Op 14 juli 2006 werd de vulkaan na decennia van rust plotseling weer erg actief. Het kwam tot een hevige uitbarsting. Door het natuurgeweld van de uitbarstende vulkaan kwamen destijds vier mensen om. Sinds zijn hevige wederopleving is de Tungurahua voortdurend actief gebleven. Vóór 14 juli 2006 was de vulkaan ook al actief, maar in mindere mate. Doorgaans hebben vulkanen cycli van verhoogde activiteit. De meest recente uitbarsting was op 28 november 2007. Voor de 300 families die in de buurt wonen van de vulkaan kwam deze uitbarsting toch ook nu weer als een verrassing. Ondanks het feit dat er dit keer geen gewonden zijn gevallen, is het opvallend dat in de moderne tijd waarin de mens nu leeft nog niet overal geavanceerde waarschuwingsapparatuur wordt gebruikt om het volk tijdig te kunnen wijzen op bijvoorbeeld een naderende vulkaanuitbarsting.

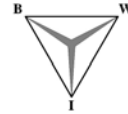
Dat op de flanken van de Tungurahua wel degelijk geavanceerde apparatuur aanwezig is, komt door de grote hoeveelheid onderzoekers die voor de wetenschap onderzoek doen naar het wel en wee van vulkanen en hun activiteit. De toepassing van draadloze sensornetwerk technologie om zowel de verhoogde activiteit als de uitbarsting van een vulkaan te kunnen monitoren is in juli 2004 door een multidisciplinair team van onderzoekers van de Harvard universiteit, de universiteit van New Hampshire en de universiteit van North Carolina uitgerold. Ze waren hiermee het eerste team dat gebruik maakte van draadloze sensornetwerken bij vulkaan onderzoek. Het doel van het team was dan ook om aan te tonen dat draadloze sensornetwerk technologie prima volstaat voor het monitoren van vulkaanuitbarstingen en mogelijk dat het zelfs beter is dan de

traditionele manieren van monitoren via een bedraad sensornetwerk. Het draadloze systeem had vooralsnog niet als doel om een waarschuwingssysteem te zijn voor het omwonende volk, het zou puur voor de wetenschap worden gebruikt. Toch konden met het 'proof-of-concept' op de Tungurahua ook de mogelijkheden van het systeem als waarschuwingssysteem worden bevestigd.



Figuur 5: Schematisch overzicht van sensoren op Tungurahua vulkaan in Ecuador

Het feitelijke sensornetwerk in juli 2004 bestond uit drie geluidsensoren waarvan het gemeten geluid via een centrale computer met antenne draadloos naar 9 km verderop werd verzonden. De proef was een meting gedurende 54 uren, waarin de vulkaan een aantal kleine tot middelgrote explosies per uur had. Het geluid werd door de geluidsensoren opgevangen en gemeten en gesynchroniseerd met de metingen van de aanwezige bedrade sensornetwerken. Hiermee kon worden bepaald in hoeverre het



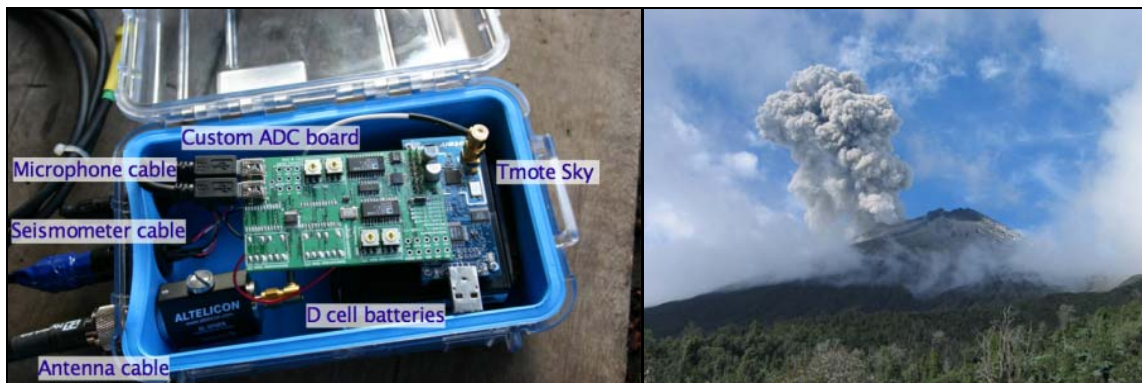
draadloze systeem functioneerde ten opzichte van de oude systemen. Het resultaat was ondanks het verlies van enige data door verbindingsproblemen verbluffend goed. Reden genoeg voor verder onderzoek.

Inmiddels heeft het betreffende onderzoeksteam nog twee draadloze sensornetwerk systemen uitgerold voor verder onderzoek op het gebied van vulkaan activiteit (in 2006 op de Reventador vulkaan en in 2007 wederom op de Tungurahua vulkaan). Het eerste onderzoek had immers aangetoond dat sensornetwerken zeer bruikbaar zijn en dat met verder onderzoek de techniek, netwerkarchitectuur en sensoren konden worden verfijnd.

Het voornaamste voordeel van draadloze sensornetwerken ten opzichte van de traditionele meetapparatuur in een bedraad netwerk was de flexibiliteit in de grootte van het te monitoren gebied. Met de communicatiestandaard voor draadloze sensoren (IEEE 802.15.4) was er wel het probleem dat slechts kleine hoeveelheden data per seconde over het netwerk konden worden doorgegeven richting de centrale ontvangende computer. Een slimme architectuur waarbij alleen data werd verzameld van alle sensoren als er daadwerkelijk een vulkanische activiteit wordt gemeten door enkele sensoren in het netwerk, was de oplossing om hiermee om te gaan. Desondanks duurde het meer dan een uur om uiteindelijk 60 seconden relevante data te verzamelen uit een netwerk van 16 sensoren. Om een goed vergelijk te maken tussen metingen met traditionele en nieuwe technologie moest data van beide meetsystemen steeds weer naast elkaar worden gelegd.

Toekomstig onderzoek naar de toepassing van draadloze sensornetwerken voor het monitoren van de activiteit van vulkanen gaat zich richten op een aantal zaken. Allereerst komt er de focus op het uitbreiden van sensoren met processoren die voorbewerking van de data kunnen doen alvorens de data naar de centrale computer te versturen. De energie die nodig is om de processor te laten draaien is vele malen lager

dan de energie voor het ontvangen en verzenden van elk los stukje data. Eventueel zou deze voorbewerking een intelligent samenspel kunnen zijn tussen verschillende sensoren om nog meer energie te besparen. Door deze moderne voorbewerking zou ten tweede de technologie om real time samengestelde data via satellieten over zeer grote afstanden te verzenden verder kunnen worden ontwikkeld. Voorbewerkte data zal immers altijd van kleinere omvang zijn dan ruwe data. Voor in de iets verdere toekomst zou ten derde onderzoek mogelijk moeten maken dat sensornetwerken bij het constateren van een uitbarsting van een vulkaan, direct satellieten kunnen inschakelen om foto's van de vulkaan te maken. Het uitbreiden van het aantal en het aantal verschillende sensoren in de bestaande netwerken is een vierde focus voor toekomstig onderzoek.

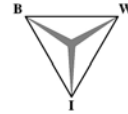


Figuur 6: Draadloze seismische en akoestische sensor (L), Tungurahua (R)

Bronnen: [11-A],[3-A]

4.3 Sensiplant

Tot slot de beschrijving van een minder grootschalig Nederlandse toepassing van draadloze sensornetwerk technologie in de glastuinbouwindustrie. Voorkomen is beter

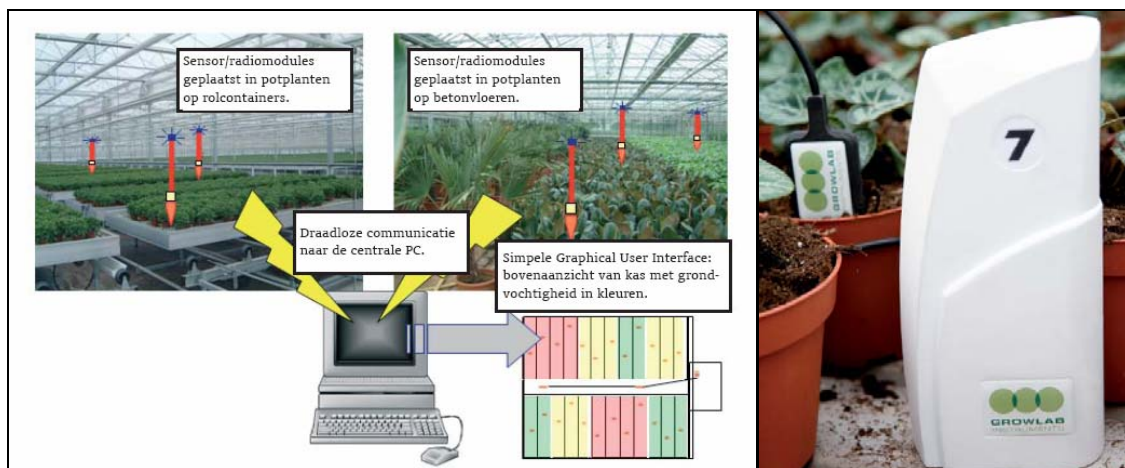


dan genezen en meten is weten. Twee gezegdes als ingrediënt voor een toepassing voor efficiëntere productie en bedrijfsvoering van een kweker...

Met het gezegde 'Meten is weten' introduceerde TNO in februari 2007 haar meest recente innovatie op het gebied van sensornetwerken. Het gezegde dat zo simpel lijkt, blijkt in de praktijk vaak nog heel complex te zijn. TNO is er desondanks in geslaagd om een innovatief sensorproduct in de glastuinbouwsector te ontwikkelen, waarmee op een betaalbare wijze de grondvochtigheid van potplanten continu wordt gemeten en daardoor kan worden bewaakt. Sensoren, die samen met Growlab Instruments worden ontwikkeld, zijn samen met de benodigde technologische infrastructuur de sleutel tot de succesvolle toepassing van het product Sensiplant.

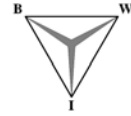
De situatie van waaruit de wens voor het product Sensiplant is ontstaan zijn de rolcontainers en vloeren waarop potplanten doorgaans worden gekweekt. Middels een zogenaamd eb- en vloedsysteem wordt water van onderaf aan de planten toegediend. Om te bepalen of planten water nodig hebben loopt een persoon driemaal per dag langs de verschillende vloeren en rolcontainers in de kas en inspecteert de vochtigheid. Er zijn verschillende manieren om dit te doen. Het voornaamste is dat het handmatig bepalen van de vochtigheid een zeer arbeidsintensieve taak is. Indien een persoon er niet in slaagt om op een dag zijn drie rondes door de kas te doen, kan dit leiden tot verkeerde watertoediening. Bovendien is het handmatig bepalen van de vochtigheid een subjectieve aangelegenheid. Als twee personen de vochtigheid anders interpreteren zorgt dit voor een verschillende watertoediening. Het gevolg van een verkeerde watertoediening is vaak vertraging of zelfs uitval van de productie. Voorkomen is in dit geval spreekwoordelijk beter dan genezen, omdat genezen van uitgedroogde of verzopen planten vaak niet meer mogelijk is.

Sensiplant is een apparaatje waarin vochtsensoren en een radiomodule zitten verwerkt. De radio module zorgt ervoor dat sensoren die bij elkaar in de buurt liggen, draadloos met elkaar kunnen communiceren. Een door TNO ontwikkeld zelforganiserend protocol zorgt voor het zichzelf organiseren van de sensoren in een draadloos communicatienetwerk. Via een centrale PC is de kweker in staat om in een bovenaanzicht van zijn kas in verschillende kleuren de grondvochtigheid te zien per vloer of container. Vochtbehoevende vloeren of containers kunnen zeer adequaat van water worden voorzien. Dit komt op zijn beurt de productie ten goede en zorgt dus voor een efficiëntere bedrijfsvoering met een hoger rendement. Positieve bedrijfseconomische gevolgen dus.



Figuur 7: Illustratie van werking Sensiplant (L), uitvergroting sensor (R)

Aan de technische basis van Sensiplant ligt de in 2003 gestandaardiseerde draadloze communicatietechnologie: Low-Rate Wireless Personal Area Network (IEEE 802.15.4, ook al genoemd in §2.1.2). Het is een technologie die sterk lijkt op de al eerder gestandaardiseerde WLAN/Wifi technologie. Het grote verschil is de energiezuinigheid ten opzichte van WLAN/Wifi. Er kan slechts weinig data per seconde worden verzonden,

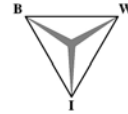


waardoor minder energie voor communicatie nodig is. De sensoren kunnen voor lange tijd op relatief kleine batterijen functioneren.

Het zelforganiserende protocol wat gebruikt wordt in de Sensiplant toepassing zorgt ervoor dat indien er sensoren uitvallen of worden verplaatst, er opnieuw een communicatieroute wordt gevonden die alle nog aanwezige sensoren weer draadloos verbindt met de centrale computer. Bij uitval van een sensor is er nog de extra functionaliteit dat deze uitval wordt doorgecommuniceerd naar de centrale computer, zodat de kweker eventuele actie kan ondernemen om de uitgevallen sensor weer aan de praat te krijgen. Het gewaarborgde 'Plug & Play' principe maakt mogelijk dat naar wens onbeperkt sensoren kunnen worden toegevoegd en worden verplaatst. Er kunnen dus heel grote oppervlakten met potvloeren en -containers continu in de gaten worden gehouden.

In de toekomst zouden de sensoren kunnen worden uitgebreid om naast grondvochtigheid ook andere relevante zaken in de potgrond te meten zoals temperatuur en CO². TNO is hier hard mee bezig. Ook wordt gekeken naar de mogelijkheden om Sensiplant klaar te maken voor de minder gecontroleerde buitenomgeving, waarbij regenval ook van invloed is op de vochtigheid van de grond.

Bron: [3-W]



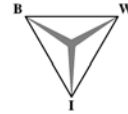
5. Issues met betrekking tot sensornetwerken

Bij het huidige gebruik en inzetten van draadloze sensornetwerk technologie in verschillende toepassingsgebieden is veel mogelijk omdat er inmiddels een heleboel succesvol onderzoek is gedaan. Er zijn echter ook vele beperkingen bij het gebruik en inzetten van (beoogde) toepassingen van sensornetwerken omdat de huidige stand van onderzoek nog tekort schiet. De beperkingen zullen steeds weer overwonnen moeten worden door nieuw wetenschappelijk onderzoek, alvorens een volgende generatie toepassingen kan worden gerealiseerd. Per gekozen aandachtsgebied (zie de splitsing van de hoofdonderzoeksvraag in Hoofdstuk 2) worden in dit Hoofdstuk zowel genomen hordes als spelende issues besproken. Er wordt hierbij niet ingegaan op technische details omdat deze uitstekend beschreven zijn in de geraadpleegde literatuur. Het spreekt vanzelf dat nieuwe toepassingsideeën van sensornetwerken in de toekomst weer voor nieuwe weg te nemen belemmeringen zorgen.

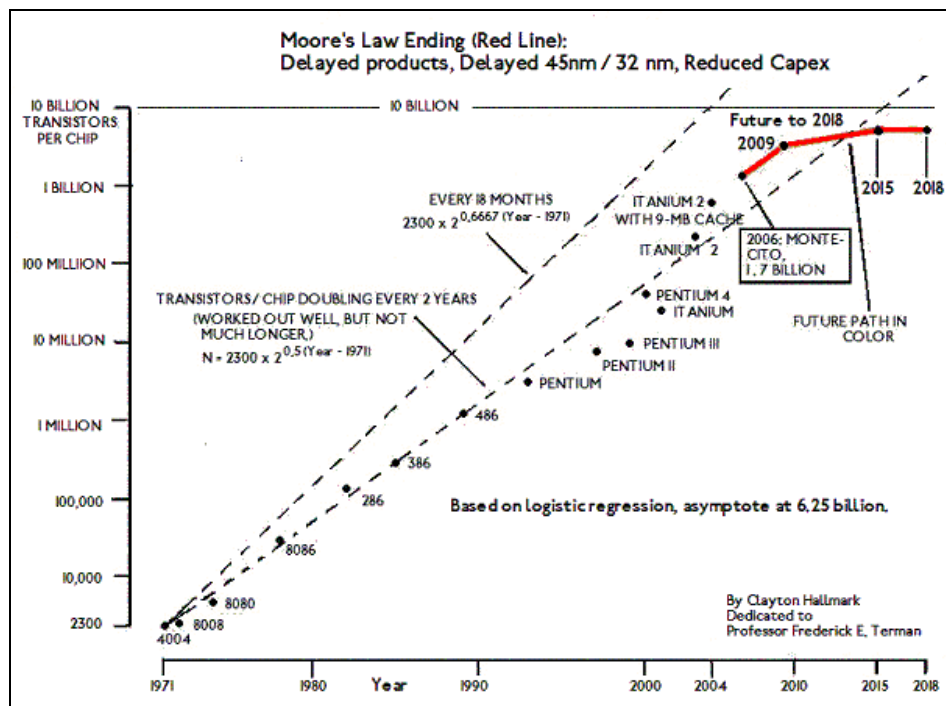
Bronnen: [12-A], [13-A], [14-A], [15-A], [16-A], [17-A]

5.1 Hardware ontwikkeling

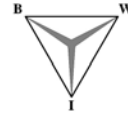
De hardware in sensornetwerken vormt het tastbare onderdeel van de netwerken. De hardware bestaat uit de volledig uitgeruste sensoren met processoren en de computers die in al dan niet draadloos contact staan met de sensoren. De trend voor de ontwikkelingen op het gebied van hardware in het algemeen vormen tevens de basis van de trend voor de ontwikkelingen van hardware voor sensornetwerken. Meer en betere toepassingen in sensornetwerken zijn mogelijk als de hardware nog kleiner en krachtiger zal worden.



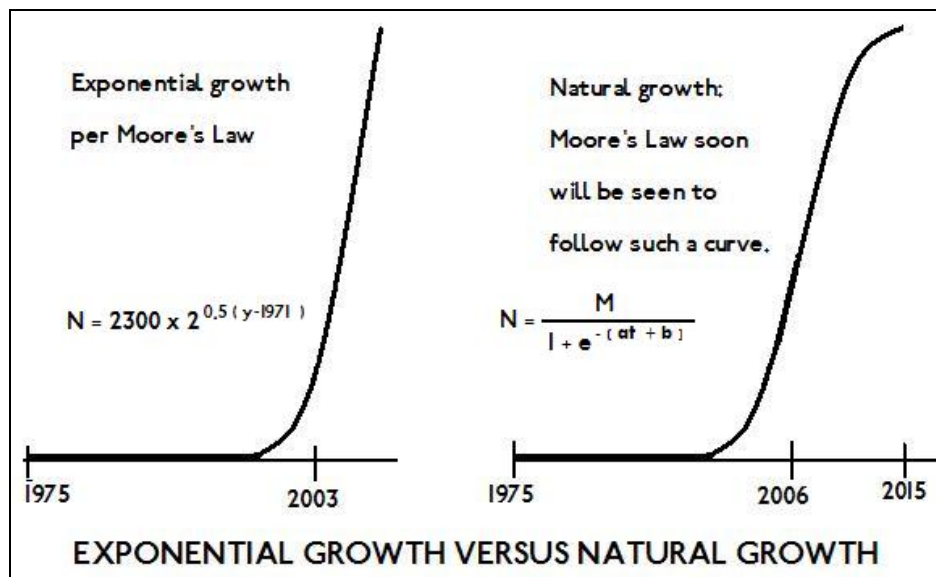
Volgens de Wet van Gordon Moore zal dit de komende jaren zeker nog het geval zijn. De wet stelt dat het aantal transistors op een computerchip door de technologische vooruitgang elke 18 maanden verdubbelt. Toen deze voorspelling in 1965 gedaan werd door Moore, één van de oprichters van chipfabrikant Intel, had niemand verwacht dat dit haalbaar was. In 1970 stelde Moore de voorspelling enigszins bij. Hij ging ervan uit dat het groeitempo zou vertragen tot een verdubbeling per 24 maanden. Tot op vandaag (begin 2008) houdt de wet nog altijd stand, ook al houden deskundigen er rekening mee dat de vooruitgang binnenkort nog langzamer zal gaan verlopen, zoals met de rode lijn in onderstaande figuur wordt geschetst. De reden daarvoor is dat de steeds verder doorgevoerde miniaturisatie niet langer alleen afhankelijk is van technologische vooruitgang, maar ook gehinderd wordt door fundamentele fysische barrières.



Figuur 8: De Wet van Moore en het verwachte einde van de wet (rood)

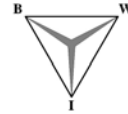


Als de fundamentele fysische barrières worden bereikt zal weliswaar het formaat van de hardware niet meer afnemen, maar kan nog wel een kwalitatieve verbeteringsslag plaatsvinden. Of ooit volledig uitgeruste 'Smart Dust' kan worden gerealiseerd ter grootte van stofdeeltjes is eveneens afhankelijk van wanneer de fysische barrières worden bereikt. De toepassing van 'Smart Dust' is ook nog eens bepalend voor de grootte ervan. Hoe meer sensoren en processoren, hoe groter de 'mote'



Figuur 9: Verschil tussen groeicurve van Moore en huidige inzicht

De Wet van Moore gaat voorlopig dus alleen op voor microprocessors en MEMS (Micro ElectroMechanical Systems). Een sensor 'mote' bestaat echter niet alleen uit deze twee onderdelen, maar ook nog uit een energiebron. Indien de energiebron qua formaat achterblijft bij de hardware van de sensor, zal de energiebron de beperkende factor zijn in het steeds kleiner maken van sensoren. Momenteel is dit de realiteit. Desalniettemin gaat de miniaturisatie van processoren en MEMS onverminderd door.

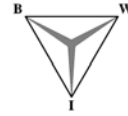


Bronnen: [2-W]

5.2 Veiligheid

De bezorgdheid om de veiligheid van informatie die afkomstig is van sensornetwerken of over sensornetwerken wordt verspreid, is vergelijkbaar met de veiligheidszorgen die er zijn bij informatieverbreiding over bijvoorbeeld het Internet. Ontwerpers van sensornetwerken die gevoelige data monitoren en verspreiden, moeten zich er bij hun ontwerp van bewust zijn dat er altijd kapers op de kust zijn die proberen de gevoelige data in handen te krijgen dan wel de informatiestroom te verstoren. In een draadloze omgeving, meer nog dan bij een bedraad medium zoals het Internet, is het relatief eenvoudig om met een slimme hack onderdeel te worden van het netwerk en op deze manier relevante gegevens te achterhalen. Om er zeker van te zijn dat de data in een sensornetwerk veilig is moeten alle componenten van het sensornetwerk beveiligd zijn. Eén onbeveiligde component is vaak voldoende om via deze component toch door te dringen tot de informatie die via het totale sensornetwerk wordt verspreid, met mogelijk alle kwade gevolgen van dien. Momenteel zijn de veiligheidsmechanismen in wireless sensornetwerken nog niet toereikend vanwege de nieuwheid en relatieve openstelling aan veel invloeden van buitenaf.

Met name in het geval dat sensornetwerken voor militaire doeleinden worden ingezet zullen tegenstanders er uiteraard alles aan doen om de informatiestroom via de netwerken te dwarsbomen of in handen te krijgen. Een goede manier om het dwarsbomen te bewerkstelligen is het ernstig verstoren van de verzend en ontvangst functionaliteiten van een sensornetwerk middels het uitzenden van signalen van zeer hoge energie door het sensornetwerk heen. Als de verstoring groot genoeg is, kan deze zelfs leiden tot volledige uitschakeling van het netwerk. Ook modernere manieren kunnen worden gebruikt bij het verstoren van de communicatie. Zo kan bijvoorbeeld slim

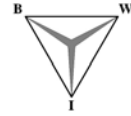


worden ingespeeld op het MAC protocol in het wireless sensornetwerk door een stoorzender met een willekeurig MAC adres continue toegang te laten vragen tot het netwerk, teneinde de energiebron van de individuele sensoren uit te putten en ze daarmee uit te schakelen.

Hoe simpel deze invloeden van buitenaf ook lijken, het is zeker niet makkelijk om een sensornetwerk hier volledig tegen te beveiligen. Er zal nog veel onderzoek moeten worden gedaan om met name het afluisteren van en knoeien met gevoelige sensornetwerken te voorkomen. Misschien is het wel een utopie om te denken dat de communicatie binnen sensornetwerken honderd procent veilig wordt in de toekomst. Het ontwikkelen van mechanismen die de veiligheid waarborgen is immers mensenwerk, dus ontwikkelen van mechanismen die de veiligheid verstoren is dan ook mogelijk.

Afgezien van de zorgen die er zijn op het gebied van veiligheid in sensornetwerken zijn er ook al een aantal zorgen op dit gebied weggenomen dankzij doelgericht onderzoek. Het betreft onderzoek en ontwikkeling van de volgende beveiligingstechnieken:

- Gevoelige data die over een sensornetwerk moet worden verspreid kan in elke node van het netwerk worden geëncrypt met een geheime sleutel en vervolgens worden verzonden. De geheime sleutel is enkel bekend binnen het netwerk waardoor de veiligheid van de data binnen het netwerk kan worden gewaarborgd en de data na decrypting pas kan worden gebruikt. Hoewel de veiligheid van de data is gewaarborgd kost de encryptie wel energie. En zoals in de vorige sectie is genoemd is energie een schaars goed in wireless sensornetwerken.
- Een andere vorm van beveiliging wordt gerealiseerd met het invoeren van authenticatie-regels. Alleen uit betrouwbare bronnen mag data worden ontvangen. Hierop vindt een controle plaats in de ontvangende node in een

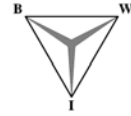


sensornetwerk. Slaagt deze controle niet, dan wordt de aangeboden data niet geaccepteerd. Ook hier speelt weer het energie issue, aangezien de controle op ontvangende data pakketjes een energie behoevende actie is.

- Om te voorkomen dat data door tussenkomst van een invloed van buitenaf veranderd is tussen twee nodes, zijn er methodes ontwikkeld die de integriteit van verzonden data kunnen checken.
- Als de data integriteit gecheckt is, na succesvolle authenticatie van de data en na succesvolle encryptie en decryptie van de data is het ook van belang om nog een check uit te voeren op de versheid van de data. Tussenkommende invloeden van buitenaf zouden mogelijk oude data opnieuw in het sensornetwerk kunnen zenden. Met behulp van verschillende methoden is de versheid van de data te achterhalen.

Voor toepassingen in gesloten omgevingen, waarbij er een laag veiligheidsrisico is omdat af luisteren of verstoren van het sensornetwerk weinig tot geen relevante informatie verschaft, kunnen relatief eenvoudige veiligheidstechnieken worden gebruikt. Dit zorgt ervoor dat vele toepassingen eigenlijk al ongestoord kunnen worden ontwikkeld en ingezet. Kritische sensornetwerk toepassingen blijven echter vragen om verder onderzoek en steeds betere beveiligingstechnieken.

Bronnen: [18-A], [19-A], [20-A]

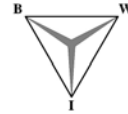


5.3 Privacy

Er kan op twee verschillende niveaus worden gekeken naar de privacy issues die spelen bij de toepassing van sensornetwerken. Afhankelijk van hoe ver de toepassingen van sensornetwerken gaan is de algemene privacy van de mens het hoge niveau waarop kan worden gekeken. Het lagere niveau is meer technisch van aard en richt zich op de manier waarop privacygevoelige data veilig kan worden gemanaged over een sensornetwerk. Dit laatste heeft dus veel raakvlak met de vorige sectie over veiligheid in sensornetwerken.

Allereerst dus het hoge niveau waarop kan worden gekeken. Hoe kleiner sensor 'motes' zullen zijn in de toekomst, hoe groter de kans is en mogelijkheden er zijn om sensornetwerken voor illegale en/of onethische doeleinden te gebruiken. Zowel bedrijven, overheden als individuen kunnen sensor 'motes' gebruiken om mensen en hun gewoontes te monitoren zonder dat ze daar weet van hebben. Op deze manier kan de sensor netwerk technologie bijvoorbeeld ook als spionagemiddel worden ingezet. Er zullen duidelijke regels moeten komen om te voorkomen dat mensen zich in hun privacy aangetast voelen. Hierin speelt de politiek een belangrijke rol. Omdat de ontwikkelingen van toepassingen van sensornetwerken nog in volle gang zijn en de omvang en impact van deze toepassingen nog niet vaak de privacygrens van de mens overschrijden, is er nog veel geoorloofd. De vraag is nu hoe lang het nog duurt voordat bepaalde toepassingsgebieden middels regels en wetten aan banden worden gelegd.

Ten tweede is er het technische niveau waarop privacy moet worden gewaarborgd. Welke protocollen en slimigheden bouw je in, in elk autonoom opererende sensor node, om gevoelige data over een netwerk te verplaatsen zonder dat er in het netwerk informatie achterblijft waaruit de herkomst of de inhoud van de data te achterhalen valt? Er is veel onderzoek gaande naar steeds betere manieren van data transmissie. De



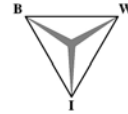
nieuwe technieken houden rekening met eventuele kapers op de kust (lees: invloeden van buitenaf die proberen gevoelige data te onderscheppen). Centraal in deze nieuwe technieken staat de hoge mate van anonimiteit die vereist is in de routing protocollen en nodes. Als data anoniem wordt verspreid betekent dit vaak dat het privacygevoelige stuk informatie verloren gaat. Hierdoor is data evengoed nog erg bruikbaar voor bijvoorbeeld algemene conclusies over te monitoren omgevingsfactoren.

Bronnen: [2-A], [19-A]

5.4 Energiebeheer

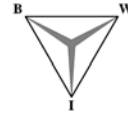
Hoe kleiner de sensor 'mote', hoe bruikbaar deze is voor huidige en toekomstige toepassingen van sensornetwerken. Dit is het motto van de wetenschap in het onderzoek om uiteindelijk 'Smart Dust' te kunnen realiseren. Dit motto geldt tevens voor de ontwikkeling van hardware ten behoeve van sensornetwerken, zoals in §5.1 reeds genoemd. Bij hardware is er de steeds verdergaande ontwikkeling in de miniaturisatie van microprocessoren en MEMS. Voor accu's en batterijen blijft de ontwikkeling hierop qua snelheid enigszins achter. De Wet van Moore is niet van toepassing voor energiebronnen en het gevolg hiervan is dat de enorme slag in de miniaturisatie van draadloze sensor 'motes' wordt gehinderd door het niet snel genoeg kleiner krijgen van accu's en batterijen met voldoende vermogen. Dat een toereikende energiebron van groot belang is voor sensornetwerken blijkt uit de vele onderzoeken die op dit vlak door de wetenschap uitgevoerd zijn.

Uit meerdere van deze onderzoeken blijkt dat de communicatie in sensornetwerken veel nauwkeuriger luistert dan de communicatie in andere computer technologische



domeinen in verband met het energieverbruik ervan. Omdat in andere domeinen netstroom de voedingsbron is voor de hardware en de technische communicatiemiddelen, wat in feite een onuitputtelijke energiebron is, hoeft bij zenden en ontvangen van informatie niet direct rekening te worden gehouden met het energieverbruik. Energie is in een draadloos sensornetwerk daarentegen de meest schaarse bron. Er moet dus zeer zuinig worden omgesprongen met energie, zeker als het om een sensornetwerk gaat waarvan de sensoren niet of bijna niet kunnen worden bereikt voor het vervangen van de energiebron. De meest energievretende bezigheid van een draadloze sensor 'mote' is het zenden en ontvangen van data. Ter vergelijking kost het verzenden van 1 bit aan data net zoveel energie als het uitvoeren van duizend instructies/acties in de processor. De wetenschap heeft zich de laatste jaren dus met name gebogen over het energiehuishouding probleem bij zenden en ontvangen van data. Al snel kwam de wetenschap met oplossingen om het energieverbruik van sensoren te beperken.

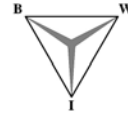
Door slimme ontwikkelde communicatieprotocollen, algoritmen en natuurlijk bijgestaan door de gerealiseerde kwaliteitsverbetering van energiebronnen is men er inmiddels in geslaagd om sensoren gedurende langere tijd autonoom te laten opereren. De protocollen en algoritmen voor zuinigere communicatie hebben de achterliggende hoofdgedachte dat sensoren in een netwerk niet per se continu actief hoeven te zijn. Als sensoren in een soort van slaaptoestand verkeren, wat betreft het zenden en ontvangen van gegevens, tot het moment dat ze getriggerd worden door bepaalde actiebehoevende meetwaarden, kan aanzienlijk veel energie worden bespaard. De energiebesparing wordt gemaakt ten opzichte van draadloze sensoren die continu communiceren. Ook het meten en bewerken van gegevens met behulp van de sensoren en processoren kan worden beperkt teneinde energie te besparen. De sensoren zouden bijvoorbeeld eens per tijdseenheid kunnen meten in plaats van continu. De verbetering van de energiebronnen in combinatie met de vernieuwde communicatieprotocollen en



algoritmen heeft in de afgelopen drie decennia al gezorgd voor een aanzienlijk verhoogde levensduur van energiebronnen van uren tot jaren.

Omdat beoogde toepassingen van sensornetwerken steeds kritieker worden zal onderzoek onverminderd doorgaan om protocollen, algoritmen, processoren, MEMS en energiebronnen te verbeteren. Ingewikkelde wiskundige algoritmen om gewenste data intelligent over een aantal sensor 'motes' naar een centrale computer te verzenden worden inmiddels ook al toegepast in de sensornetwerk technologie. De algoritmen houden bijna altijd rekening met de factor 'energie'. Het berekenen van bijvoorbeeld de kortste paden door een sensornetwerk over zo min mogelijk 'motes' met een algoritme is geen gemakkelijke opgave. Dit komt omdat nog vele andere factoren een rol spelen bij deze berekening. Bovendien garandeert een gevonden kortste route niet de meest efficiënte (lees: energiezuinige) route te zijn. De afstand waarover de data verzonden moet worden naar een centrale computer of een volgende sensor 'mote' heeft namelijk een polinomiaal effect op de energiekosten. Meer kleine stapjes (multi-hop) in het sensornetwerk kan dus goedkoper zijn dan kleinere hoeveelheid grote stappen.

In situaties waar de grootte van de sensor niet van direct belang is voor een correcte werking van het sensornetwerk, kan een sensor ook worden uitgerust met gereedschappen om energie op te wekken. Denk hier bijvoorbeeld aan solarcellen die licht om kunnen zetten in energie (zie Figuur 2) of cellen die trillingen of warmte om kunnen zetten in energie. De wetenschap buigt zich momenteel ook over een mogelijk nieuwe vorm van energietoevoer. Het gaat hier om energie uit levende organismen, uit 'microcombustion' en uit nucleaire batterijen. Met name de energie uit levende organismen staat hoog op de wetenschappelijke agenda. Omdat het om zeer kleine hoeveelheden energie gaat, uit bijvoorbeeld spinazie, suiker en vliegen, richt onderzoek zich nu op het kunnen voeden van micro- en toekomstige nano-objecten.



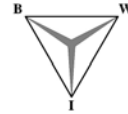
Bronnen: [14-A], [21-A], [22-A]

5.5 Topologie en dekking

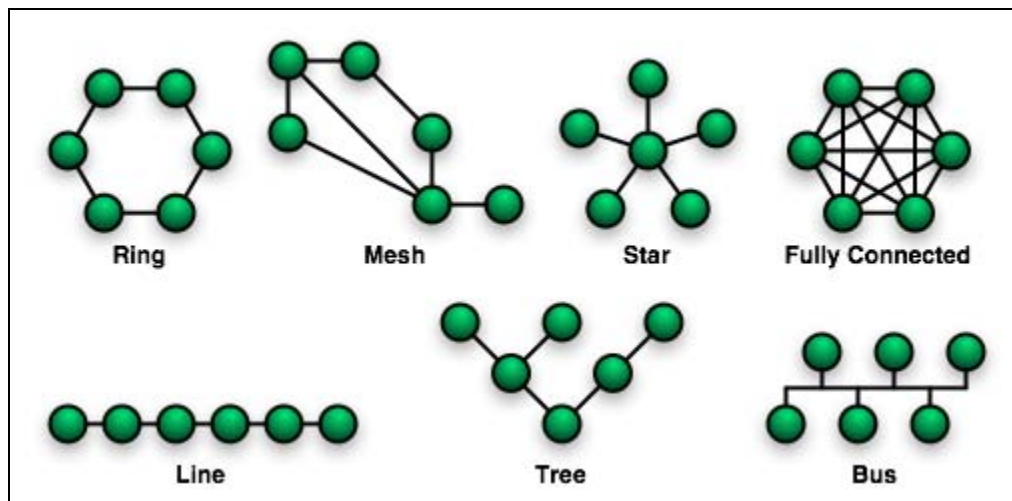
De manier waarop computers binnen een netwerk zijn ingedeeld en gekoppeld wordt ook wel de netwerktopologie van het computernetwerk genoemd. Feitelijk is een sensornetwerk een vergelijkbaar netwerk met een computernetwerk. De autonome sensoren zijn de computers die bedraad en/of draadloos met elkaar verbonden zijn volgens een bepaalde indeling. Vandaar dat men bij sensornetwerken eveneens spreekt van netwerktopologie als het om de indeling en koppeling gaat van de verschillende nodes. Er zijn een aantal gangbare netwerktopologieën denkbaar (zie Figuur 10). In de praktijk komt het regelmatig voor dat in netwerken verschillende topologieën door elkaar heen worden gebruikt.

De keuze van een netwerktopologie voor een sensornetwerk is bepalend voor de snelheid waarmee gemonitord data over het netwerk kan worden verspreid. Tevens is de topologie bepalend voor het energieverbruik van de nodes in het netwerk. Het is dus heel belangrijk dat een goede topologie wordt gekozen bij het uitrollen van een sensornetwerk. Ondanks dat een goede topologie is gekozen maakt de dynamiek van een sensornetwerk het een ware uitdaging om deze topologie te handhaven en te onderhouden.

Een sensornetwerk kan bestaan uit honderden of soms wel duizenden sensoren die met elkaar communiceren en gegevens uitwisselen. Vaak is niet te zeggen op welke afstand de verschillende sensoren van elkaar liggen. De afstanden kunnen variëren tussen de centimeters, meters en decameters. De snelheid van realiseren van de beoogde

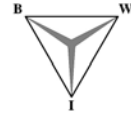


topologie is in zo'n netwerk afhankelijk van de manier waarop het netwerk is uitgerold. Een nette uitrol kost meer tijd, maar levert wel direct de juiste topologie op. Een willekeurige uitrol (denk aan: uit vliegtuig, uitstrooien) kost minder tijd, maar zorgt wel voor een duurdere realisatie van de gewenste topologie. In beide manieren van het uitrollen van een sensornetwerk kan de topologie in de loop van de tijd veranderen door veranderingen in het netwerk. Er kunnen nodes kapot gaan, er kunnen nodes van positie verplaatsen en er kunnen nodes zonder energie komen te zitten. Ook is het mogelijk dat nodes tijdelijk niet functioneren door obstakels die ze isoleren en stoorzenders die ze verstoren.



Figuur 10: Verschillende voorbeelden van een netwerktopologie

De keuze van een goede netwerktopologie is ook van belang bij de realisatie van een zo goed mogelijke dekking van een sensornetwerk. De dekking geeft aan in hoeverre een te monitoren gebied daadwerkelijk kan worden gemonitord door de verspreide nodes. In toepassingen waar bijvoorbeeld alarm moet worden geslagen als een indringer langs een bepaalde barrière wil komen is de dekking van het netwerk zeer relevant. Alleen bij



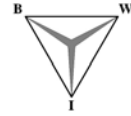
een 100% dekking van het netwerk zal het alarm altijd afgaan. Veranderingen van de topologie kan de dekking van een netwerk sterk beïnvloeden.

De wetenschap richt zich momenteel op verschillende vraagstukken met betrekking tot netwerktopologie en netwerkdekking. Tot nu toe heeft eerder onderzoek al geleid tot enkele mooie resultaten. Door het uitrusten van sensoren met slimme (communicatie)algoritmen wordt bijvoorbeeld uitval van buursensoren in het netwerk doorgeven aan de overige sensoren. Hierdoor kan een zo goed mogelijke dekking van het te monitoren gebied gerealiseerd blijven, omdat buursensoren in staat zijn om taken van de uitgevallen sensoren over te kunnen nemen. Ook kan de uitval van sensoren naar buiten het netwerk worden gecommuniceerd om eventuele reparatie van uitgevallen sensoren te triggeren.

Bronnen: [23-A]

5.6 Lokaliseren

Eigenlijk net als de overige issues die in dit werkstuk beschreven zijn, is ook het lokalisatie issue in sensornetwerken zeer relevant en veel onderzocht door de wetenschap. Lokalisatie is kort gezegd het probleem dat zich bezighoudt met het in kaart brengen van de locatie van sensoren in een sensornetwerk. Het in kaart brengen van de locatie van een sensor maakt het in de eerste plaats mogelijk om uitspraken te kunnen doen over deze individuele sensor en zijn specifieke plaats, aan de hand van zijn meetgegevens. Door alle sensoren met hun meetgegevens in het netwerk in kaart te brengen, kunnen ook uitspraken worden gedaan over sensoren ten opzichte van elkaar op elke willekeurige plek in het netwerk. Naast de interpretatie van meetgegevens van een sensor op een specifieke plek kan met lokalisatie ook een uitgevallen sensor

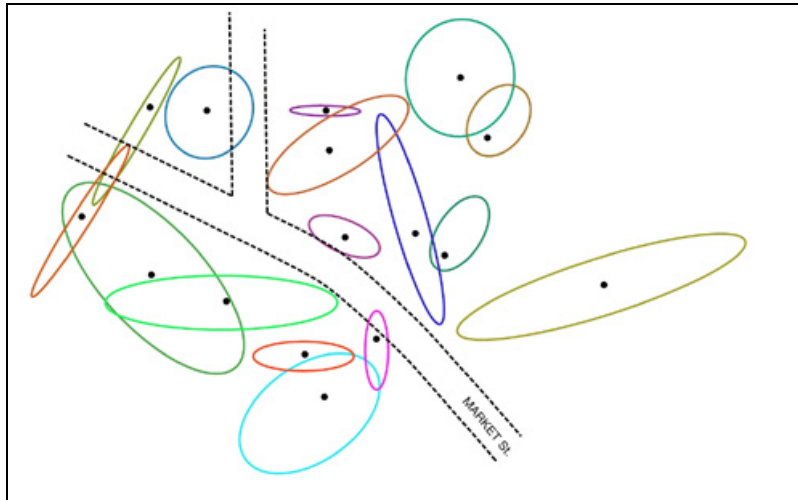


worden getraceerd zodat het makkelijker is om gerichte herstelwerkzaamheden uit te voeren.

Er zijn twee gangbare manieren waarmee lokalisatie kan worden gedaan. De eerste manier is globale lokalisatie met behulp van het sensornetwerk zelf. De tweede manier is absolute lokalisatie met behulp van bijvoorbeeld GPS (Global Positioning System) systemen.

- In de eerste manier van lokaliseren is het de grote uitdaging om met behulp van diverse wiskundige technieken en de communicerende sensoren de geometrische structuur van een sensornetwerk zo goed mogelijk te reproduceren. Uit onderzoek is al gebleken dat een exacte reproductie van de netwerkstructuur van een sensornetwerk al een 'NP-hard' probleem is als slechts een kleine hoeveelheid meetgegevens ontbreken, oftewel onoplosbaar. Indien wel de juiste meetgegevens beschikbaar zijn is het eveneens een zeer moeilijke opgave om het netwerk te reproduceren. Vandaar dat vele onderzoeken zich ook richten op technieken die onder bepaalde aannames de netwerkstructuur kunnen benaderen. In de onderstaande afbeelding (Figuur 11) is een benadering te zien van de gebieden waarin sensoren volgens berekening moeten liggen.

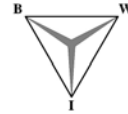
Het valt positief op dat de berekende gebieden allemaal hun sensor bevatten. De lokalisatietechnieken die in deze berekening zijn gebruikt zijn blijkbaar nauwkeurig genoeg om dat te bewerkstelligen. Wat tevens opvalt is de doorgaans elliptische vorm van de locatiegebieden. Dat de locatiegebieden zo groot zijn komt door ontbrekende data, aannames in de lokalisatietechniek en eventuele ruis in het netwerk.



Figuur 11: Berekende contouren van locatiegebied zichtbare sensoren

- In de tweede manier van lokaliseren is het de uitdaging om gebruikmakend van een zo 'goedkoop' mogelijk positioneringhulpmiddel (bijvoorbeeld GPS) de absolute positie van willekeurige sensoren in het netwerk vast te stellen. Vervolgens kan met het in kaart brengen van de verschillende sensoren in het netwerk eenvoudig een reproductie worden gemaakt van de netwerkstructuur.

Bij beide manieren is het de grote uitdaging om technieken te vinden die zo goedkoop mogelijk kunnen lokaliseren. De kosten worden meestal uitgedrukt in de hoeveelheid energie die nodig is voor het berekenen/vaststellen van de netwerkstructuur. Uit onderzoek blijkt dat absolute lokalisatie vele malen duurder is dan relatieve lokalisatie, ook al is de absolute lokalisatie wel veel nauwkeuriger. De kosten zitten hem naast energieverbruik ook in de veel duurdere hardware bij globale lokalisatie. De hoge kosten hiervoor zijn dan ook de voornaamste reden dat er meer onderzoek wordt gedaan naar technieken die relatief kunnen lokaliseren enkel gebruikmakend van de sensoren in het netwerk.



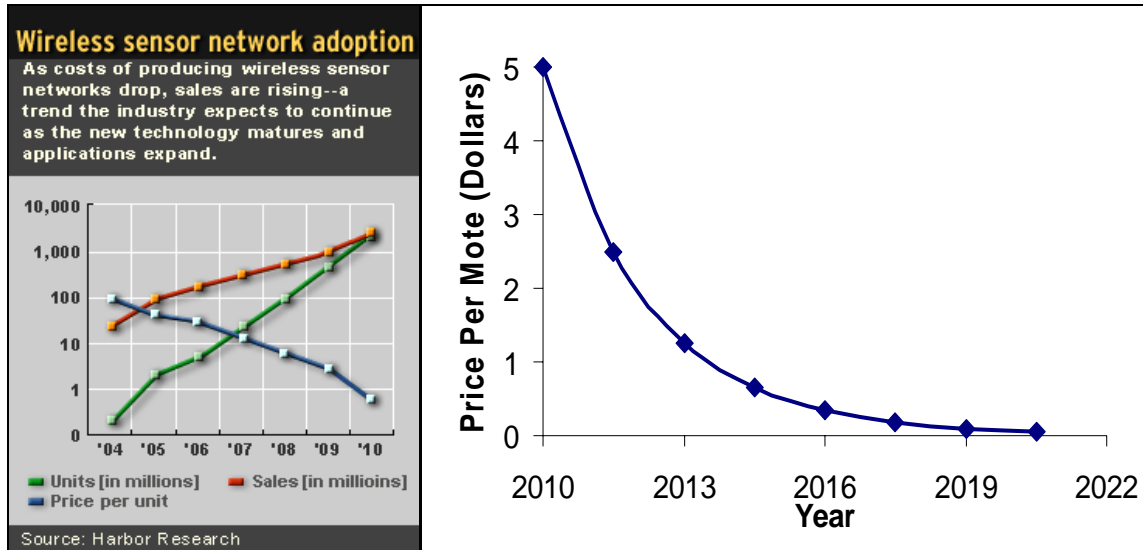
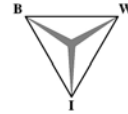
Bronnen: [6-W], [16-A], [21-A], [24-A], [25-A], [26-A]

5.7 Kosten

De steeds verdergaande technische vooruitgang in de industrie en de razendsnelle ontwikkeling op het gebied van draadloze sensornetwerken staan aan de basis van de (deels verwachte en deels al gerealiseerde) dalende kostentrend bij de productie van draadloze sensoren. Waar sensoren een paar jaar geleden nog honderden dollars per stuk kostten, kosten ze nu al minder dan honderd dollar per stuk en zullen ze naar verwachting van 2010 tot 2020 nog eens dalen in kostprijs per stuk van 5 dollar naar 5 dollarcent (zie Figuur 12).

Ook al zal volgens de trend een sensor steeds minder gaan kosten, de producenten van sensoren zullen er qua omzet niet op achteruit gaan de komende jaren. De reden hiervoor is de steeds grotere vraag vanuit de markt waarin de ene na de andere innovatieve toepassing met draadloze sensornetwerk technologie uit de grond schiet. Er wordt ook verwacht dat sensoren steeds geavanceerder worden. Dit zal over het geheel gezien de dalende kostentrend waarschijnlijk niet gaan beïnvloeden.

De sensoren markt is sinds het publieke verschijnen van sensornetwerk toepassingen in de jaren negentig aanzienlijk gegroeid. De totale marktomzet in sensoren was in 2004 al 347 miljoen dollar. Maar de groei zal sterk aanhouden. Naar verwachting zal in 2010 de marktomzet van 2004 met een factor 20 zijn vermenigvuldigd tot ongeveer 7 miljard dollar. Het ligt voor de hand dat er de komende jaren steeds meer producenten komen van sensoren om deze groei, zowel in omvang als in diversiteit, te kunnen realiseren.



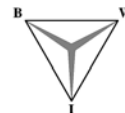
Figuur 12: Kosten sensorontwikkeling per sensor (L), trend kosten per sensor (R)

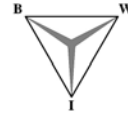
De huidige kostprijs van sensoren is voornamelijk afhankelijk van de opties en software die op een sensor aanwezig zijn en de afnamegrootte. Als batterijen aanwezig zijn hoeven geen hoge kosten te worden gemaakt voor bedrade voedingen. Als plug en play software is geïnstalleerd hoeven geen kosten te worden gemaakt voor 'custom made' software. Als meerdere omgevingsfactoren moeten worden gemonitord moeten hogere kosten worden gemaakt voor het juist uitrusten van een sensor. Hoe meer identieke sensoren worden afgenomen hoe lager de stukprijs van de sensoren kan worden gemaakt.

Bronnen: [5-A],[6-A]

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08



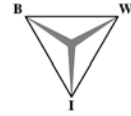


6. De toekomst van sensornetwerken

Bij de opkomst van nieuwe technologieën en de denkbare toepassingen van deze technologieën is het altijd een grote uitdaging om in te schatten wat de gevolgen voor het leven op aarde ervan zal zijn in de nabije en verre toekomst. Bij de opkomst van bijvoorbeeld de computertechnologie had men nooit durven dromen dat computers in zo'n korte tijd de wereld zouden veroveren, en toch gebeurde het. Het is zelfs algemeen bekend en aanvaard dat computers niet meer weg te denken zijn uit de huidige maatschappij. Ook al zijn de toepassingen van draadloze sensornetwerken momenteel nog niet zo ver ontwikkeld als de toepassingen van computers in het algemeen, het zal toch niet lang meer gaan duren voordat we in het dagelijks leven de eerste voorbeelden van toepassingen bewust tegenkomen. In dit Hoofdstuk wordt beschouwd wat de maatschappij in de nabij en verre toekomst mogelijk te wachten staat op het gebied van draadloze sensornetwerk technologie.

6.1 Nabije toekomst

Omdat sensornetwerk technologie nog relatief jong is, zullen de komende jaren relatief onschuldige toepassingen hun intrede doen in de maatschappij. Iedereen zal deze toepassingen zonder meer goedkeuren en mogelijk zelfs niet eens opmerken. Dit komt voornamelijk omdat de toepassingen als eerste zullen opduiken in wetenschappelijke omgevingen (denk aan testopstellingen in de natuur, nu ook al het geval), later pas in bedrijfsomgevingen (denk aan het continu monitoren van de werking van machines, ook al deels het geval) en uiteindelijk pas in menselijke omgevingen (denk aan het continu



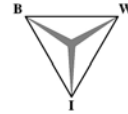
monitoren van lichaamsfuncties in de gezondheidszorg, nu nog maar heel soms het geval).

Als de sensornetwerk technologie zich dan genesteld heeft in de maatschappij begint het wachten op de eerste felle tegenstanders van toepassingen die te dicht bij de privacy van de mens komen. Er zal wetgeving moeten komen op het gebied van sensornetwerken om het vertrouwen van de maatschappij terug te winnen of te waarborgen. De politiek zal hier een voorname rol in spelen.

De toepassingen van sensornetwerken zullen de komende jaren zorgen voor verdere automatisering van achterhaalde processen en technieken. De inzet zal dus zorgen voor het verder moderniseren van de maatschappij.

6.2 Verre toekomst

Het is niet duidelijk in hoeverre er in het geheim onderzoek gaande is naar zeer complexe draadloze sensornetwerk toepassingen voor defensie doeleinden. Het is goed denkbaar dat de eerste 'schuldige' toepassingen (lees: toepassingen met grote maatschappelijke gevolgen) vanuit defensie zullen komen. Denk bijvoorbeeld aan geautomatiseerd oorlog voeren vanaf grote afstand, puur door slim gebruik van sensornetwerken. De geruchten gaan momenteel al dat de Amerikanen vormen van 'Smart Dust' hebben doorontwikkeld en gebruiken in de strijd tegen de Taliban. Zodra de ontwikkelde minuscule intelligente chips waarom het hier gaat aan kleding of ander persoonlijk materiaal kleven, zijn de personen zo te traceren. Dit is echter allemaal geheim. Maar het zou dus wel kunnen dat ondertussen de grootte en de zelfredzaamheid van een sensor al helemaal geen onderzoeksissue meer is.

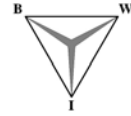


Of de techniek nu wel of niet zover verfijnd is dat sensoren ter grootte van stofdeeltjes al bestaan, de maatschappelijke impact van sensornetwerken zal in de verre toekomst heel groot zijn en steeds groter worden. We gaan hoogstwaarschijnlijk naar een wereld toe waarbij computertechnologie de mens overal en altijd zal ondersteunen: de wereld van 'Pervasive Computing' (zie § 6.3)

Het is alleen maar te hopen dat met de toekomstige inzet van sensornetwerken puur doelen worden gerealiseerd die de mensheid positief dienen, ook al is deze gedachte eigenlijk te mooi om waar te zijn.

6.3 'Pervasive Computing'

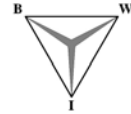
De visionair en wetenschapper Mark Weiser voorzag eind jaren tachtig een wereld waarin het leven op aarde volledig ondersteund zou worden door de inzet van computers. Hij voorzag dat computers de mens zodanig adequaat zouden kunnen ondersteunen in al hun dagelijkse acties, dat vergeten zou worden dat er computers aan de acties ten grondslag lagen. De computers zouden volgens hem in een wereldwijd netwerk met elkaar kunnen communiceren maar ook op kleinere schaal. De samenwerking tussen de verschillende nodes in dit netwerk zou de mens op elke gewenste plaats op aarde van dusdanig adequate informatie kunnen voorzien dat eventueel uit te voeren acties veel makkelijker zouden worden. Mark Weiser noemde dit 'Ubiquitous Computing', en later ook wel 'Pervasive Computing'. Hij zag het als de derde grote golf op het gebied van de computertechnologie. Eerst was er de ontwikkeling van de 'mainframe computer' die werd gedeeld door veel menselijke gebruikers tegelijk, vervolgens was er de ontwikkeling van de 'personal computer' (PC) die ervoor zorgde dat ieder mens zijn eigen computer had, en als derde zou er dan 'Pervasive Computing' zijn, waarbij de computer (lees: techniek) op de achtergrond van het menselijk leven zou



komen te staan en daar zijn werk zou doen. Computertechniek zou onzichtbaar onderdeel gaan worden van de maatschappij. Het zou gaan bijdragen bij het verschaffen van informatie aan de mens zonder het zou vragen om de aandacht van de mens.

De inmiddels overleden Weiser zorgde destijds voor veel opschudding met zijn visie. Nu, twintig jaar later kan gezegd worden dat zijn visie helemaal niet zo slecht was. De enorme ontwikkelingen in de computertechnologie, waaronder ook de sensornetwerk technologie, heeft inmiddels gezorgd voor de realisatie van een groot deel van de zaken die Weiser in zijn visie noemde. Zal zijn visie ooit volledig waar worden? Hij zal het zelf helaas nooit gaan meemaken.

Bron: [2-A], [21-A]

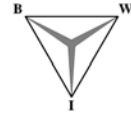


7. Conclusies

In technische zin lijken we de 'science fiction' met sensornetwerken voorbij. Er zijn de afgelopen jaren zoveel mogelijkheden ontstaan door de continue succesvolle uitvoering van wetenschappelijk onderzoek dat de aandacht voor sensornetwerk technologie alleen maar toe zal gaan nemen in de toekomst.

'Smart dust' is inmiddels dus realiseerbaar geworden, zij het nog niet helemaal op de manier zoals visionair Dr. Kris Pister het begin jaren negentig voor ogen zag. Alhoewel... Niemand weet exact hoe ver bijvoorbeeld de Amerikaanse krijgsmacht nu echt is bij de ontwikkeling van sensornetwerken met minuscule sensoren voor militaire toepassingen. Niemand weet dan ook hoe lang het nog gaat duren voordat het stofvrij maken van een kamer echt een andere betekenis gaat krijgen dan nu nog het geval is.

Dat in dit werkstuk specifiek de zeven issues, hardware, veiligheid, privacy, energie, topologie en dekking, lokalisatie en kosten de revue zijn gepasseerd, komt omdat het onderzoek naar het grootste deel van deze issues de afgelopen jaren een heleboel zaken mogelijk heeft gemaakt in de sensornetwerk technologie en bij verder onderzoek in de toekomst ook nog mogelijk zal gaan maken. Het zijn de hoofdonderwerpen geweest voor recent onderzoek in sensornetwerken. Ondanks dat dit onderzoek al veel vruchten heeft afgeworpen zal de komende jaren zeker nog verder onderzoek moeten worden gedaan op de verschillende relevante gebieden. Alleen het kosten issue uit dit verslag is geen onderwerp geweest van recent wetenschappelijk onderzoek. Het issue laat echter wel zien wat de huidige en toekomstige economische impact kan zijn van de steeds verdergaande toepassingen van de sensornetwerk technologie in de wereld. Dit is dan ook de reden dat het issue onderdeel uitmaakt van dit werkstuk. De groeitrend in

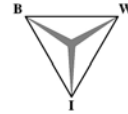


de totale omzet van de sensorenmarkt die opgesteld is aan de hand van de groei in de afgelopen jaren maakt dit eens te meer duidelijk.

De zeven beschreven issues hebben allemaal veel raakvlak met elkaar. Sensornetwerk ontwikkeling en het doen van onderzoek kost geld, processen binnen sensornetwerken kosten energie, meer veiligheid kost meer energie, snelle technieken zijn vaak goedkoop maar minder veilig, nieuwe technologie dringt steeds verder door in de privacy van de mens. Misschien is deze verwevenheid van onderwerpen ook wel de reden dat onderzoek zich doorgaans op één onderzoeksgebied tegelijk richt. Het resultaat dat immers met het ene onderzoeksgebied wordt behaald, heeft consequenties voor de resultaten van het andere onderzoeksgebied; een allerm minst wenselijke situatie voor wetenschappelijk onderzoek.

Hardware in sensornetwerken is de afgelopen jaren steeds compacter geworden en steeds geavanceerder. Op het gebied van hardware zullen de pijlen ook de komende jaren met name gericht zijn op het steeds kleiner maken van sensoren. Niet alleen de grootte is dus van belang maar ook de interne kracht van een sensor. Processoren zullen sneller worden, geheugencapaciteit zal groter worden en de sensoren (MEMS) zullen steeds geavanceerder zijn en meer omgevingsfactoren kunnen monitoren.

Veiligheid is zeer belangrijk gebleken in de korte geschiedenis van sensornetwerken. Hoe bedrijfskritischer de data is die over een sensornetwerk wordt verspreid, hoe groter het belang is van veiligheid. Omdat sensornetwerken vaak worden ingezet in gesloten omgevingen of voor niet al te bedrijfskritische zaken is voor normaal gebruik een simpele beveiliging voldoende. De toekomstige toepassingen van sensornetwerken vragen echter om een 100% veilige manier van datatransmissie. Om deze reden is er veel onderzoek gaande om slimme beveiligingstechnieken te realiseren. De komende

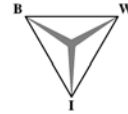


jaren zullen ook in het teken staan van het ontwikkelen van steeds betere technieken en mechanismen op dit gebied.

Privacy van de mens, zowel als individu als in groep, en privacy van relevante data zijn bij elke nieuwe technologische ontwikkeling belangrijk gebleken. Zo ook bij de razendsnelle ontwikkeling op het gebied van sensornetwerken. Slimme algoritmen en complexe theorieën kunnen bijdragen aan de privacy van data in een sensornetwerk en dat is dan ook hetgeen waar veel onderzoek naar wordt gedaan. De politiek en de wetenschap zullen er in samenwerking voor moeten zorgen dat ook de privacy van de mens in het algemeen wordt gehandhaafd de komende jaren.

Energie lijkt in het dagelijks leven een onuitputtelijke bron. Niks is echter minder waar, zeker niet in sensornetwerken waar gebruik wordt gemaakt van sensoren die met elkaar in verbinding staan middels draadloze communicatiemiddelen gebruikmakend van geavanceerde communicatieprotocollen. De sensoren en hun processoren moeten worden gevoed, vaak door simpele kleine batterijen. Hoe energiezuiniger de technieken van communicatie zijn en hoe energiezuiniger ook de processen binnen de sensor kunnen worden uitgevoerd, hoe langer een sensor autonoom kan opereren. De verbetering van communicatietechnieken en procesverwerking is dus waar veel onderzoek zich op richt ten bate van de energiezuinigheid. Ook is er onderzoek dat zich richt op de kwaliteitverbetering van energiebronnen. Beide takken van onderzoek zullen de komende jaren onverminderd door moeten gaan.

Topologie en dekking zijn twee verwante issues die van groot belang zijn bij sensornetwerken. Een goede netwerktopologie zorgt voor goedkope en uiterst betrouwbare datatransmissie binnen het netwerk. Bovendien kunnen de taken van uitgevallen sensoren in een sensornetwerk bij de juiste topologie snel worden opgepakt door aangrenzende sensoren. Een goede topologie in sensornetwerken is een

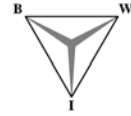


voorwaarde voor een goede dekking van een te monitoren gebied. Er zal de komende jaren onderzoek nodig blijven om steeds betere technieken te ontwikkelen om een gewenste topologie te realiseren bij het willekeurig uitrollen van een sensornetwerk. De dekking van het netwerk moet met deze technieken ook worden gerealiseerd.

Lokaliseren in draadloze sensornetwerken is mogelijk het moeilijkst onderwerp voor wetenschappelijk onderzoek. Als alle gewenste informatie voor handen is, is lokaliseren van individuele sensoren in een netwerk wel mogelijk. Het gaat dan om relatieve lokalisatie ten opzichte van de andere nodes in het netwerk. Vaak is niet alle informatie tijdig voor handen en dan is het lokalisatieprobleem ook direct 'NP-hard' (onoplosbaar in eindige tijd). Globale lokalisatie kan worden gerealiseerd met behulp van positioneringhulpmiddelen zoals GPS. Dit zijn wel stroomvreters. Onderzoek moet zich de komende jaren gaan richten op technieken die steeds nauwkeuriger, eventueel bij benadering, kunnen lokaliseren, ook in netwerken waar niet alle gegevens aanwezig zijn om te kunnen lokaliseren. Zuinigere positioneringhulpmiddelen zouden ook onderwerp kunnen worden van nieuw onderzoek.

Kosten van sensoren zullen de komende jaren alleen maar af gaan nemen door de sterk toenemende vraag naar sensornetwerk toepassingen. Als de kosten genoeg dalen, wordt de drempel voor ideeën voor nu nog te kostbare toepassingen alsmaar lager.

Omdat er veel onderzoek is gedaan naar de in dit werkstuk beschreven issues, is er veel wetenschappelijke literatuur over te vinden. Zelden echter gaat het om literatuur in de vorm van een beschouwend overzicht. Wat zijn sensornetwerken eigenlijk? Waar staat het wetenschappelijke onderzoek momenteel op de verschillende onderzoekstakken? En, waar moeten we nog heen met onderzoek de komende jaren? Allemaal vragen die in dit werkstuk aan de orde zijn gekomen en zijn voorzien van een beschouwend

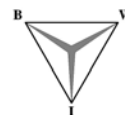


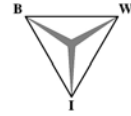
antwoord. Antwoorden die van dit werkstuk een beschouwend overzicht hebben gemaakt.

Het is moeilijk om aan te geven welke van de beschreven issues het meest belemmerend zijn voor de ontwikkeling van sensornetwerken in de toekomst. Dit komt omdat de ideale vorm van een sensornetwerk vraagt om een optimale bijdrage van onderzoek uit alle verschillende onderzoeksgebieden. Voorlopig is het dus van belang dat op alle onderzoeksgebieden volop door wordt gegaan met nieuw wetenschappelijk onderzoek. Vooral om ook de meest ingenieuze toepassingen van sensornetwerken in de toekomst te kunnen realiseren. Tegelijkertijd moet de politiek zich gaan buigen over de eventuele maatschappelijke consequenties van sensornetwerken. De mens moet vertrouwen krijgen in de uiteenlopende mogelijkheden van de sensornetwerk technologie. Langzaam maar zeker zullen op allerlei plekken sensornetwerken opduiken. Hierdoor wordt langzaam het gewenste vertrouwen gewonnen bij de mens. Mogelijk kan dan over 20 jaar een ethisch verantwoorde manier zijn gevonden om de meest uiteenlopende sensornetwerken uit te rollen op alle mogelijke plekken van de maatschappij, teneinde voordeel op te leveren voor de mensheid. Want dat is toch het doel wat moet worden bereikt...!?

DE OPMARS VAN SENSORNETWERKEN

M.W. van den Beld '08



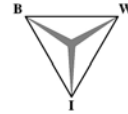


Referenties

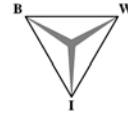
Artikelen

De volgende artikelen zijn gebruikt bij de totstandkoming van het werkstuk.

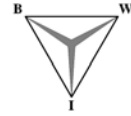
- 1 - A. Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges.
 Chee-Yee Chong and Srikanta P. Kumar
 Proceeding of the IEEE, Vol. 91, No. 8, augustus 2003
- 2 - A. Computers leren voelen.
 Hans Appel
 Sun Microsystems, januari 2006
- 3 - A. Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano
 Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, Omar Marcillo, Jeff
 Johnson, Mario Ruiz and Jonathan Lees
 IEEE Internet Computing, april 2006
- 4 - A. Emerging Challenges: Mobile Networking for “Smart Dust”
 Joseph M. Kahn, Randy Howard Katz, and Kristofer S. J. Pister
 2000
- 5 - A. Smart Dust: ISRC Technology Briefing
 Doug Steel
 Maart 2005
- 6 - A. Wireless sensor networks: a survey
 I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci
 Computer Networks 38 (2002) 393–422, december 2002



-
- 7 - A. Supercomputer voor nieuwe radiotelescoop LOFA
Pictogram 2, mei 2004
 - 8 - A. De stille revolutie van LOFAR
SURFnet Bulletin 2004.2
 - 9 - A. Wat is LOFAR... (informatiefolder)
<http://www.lofar.nl>
 - 10 - A. LOFAR (brochure)
<http://www.lofar.nl>
 - 11 - A. Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network
Geoffrey Werner-Allen, Jeff Johnson, Mario Ruiz, Jonathan Lees, and
Matt Welsh
Januari 2005
 - 12 - A. Overview of Sensor Networks
David Culler, Deborah Estrin and Mani Srivastava
IEEE Computer Society, augustus 2004
 - 13 - A. A Survey on Sensor Networks
Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal
Cayirci
IEEE Communications Magazine, augustus 2002
 - 14 - A. Maximizing System Lifetime in Wireless Sensor Networks
Qunfeng Dong
ISPN'05, 2005
 - 15 - A. Wireless Sensor Networks
F. L. Lewis
Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications, 2004
 - 16 - A. Localization in Wireless Sensor Networks
Masoomah Rudafshani and Suprakash Datta
IPSN'07, april 2007



-
- 17 - A. Research Challenges for Wireless Sensor Networks
John A. Stankovic
 - 18 - A. SPINS: Security Protocols for Sensor Networks
Adrian Perrig, Robert Szewczyk, J.D. Tygar, Victorwen and David E. Culler
Wireless Networks 8, 2005
 - 19 - A. Cryptographic Algorithms and Protocols for Security and Privacy in
Wireless Ad Hoc Networks (proefschrift)
Stefaan SEYS, mei 2006
 - 20 - A. Research Challenges for Wireless Sensor Networks
John A. Stankovic
 - 21 - A. Connecting the Physical World with Pervasive Networks
Deborah Estrin, David Culler, Kris Pister and Gaurav Sukhatme
Pervasive Computing, 2002
 - 22 - A. Maté: A Tiny Virtual Machine for Sensor Network
Philip Levis and David Culler
2002
 - 23 - A. Barrier Coverage With Wireless Sensors
Santosh Kumar, Ten H. Lai and Anish Arora
MobiCom'05, 2005
 - 24 - A. Distributed Localization Using Noisy Distance and Angle Information
Amitabh Basu, Jie Gao, Joseph S.B. Mitchell and Girishkumar Sabhnani
 - 25 - A. Habitat Monitoring With Sensor Networks
Robert Szewczyk, Eric Osterweil, Joseph Polastre, Michael Hamilton,
Alan Mainwaring and Deborah Estrin
Communications of the ACM, juni 2004
 - 26 - A. A Localization System using Wireless Network Sensors: A Comparison of
Two Techniques



Mark Terwilliger, Ajay Gupta, Vijay Bhuse, Zille Huma Kamal, and
Mohammad Ali Salahuddin
2004

Websites

De volgende websites zijn gebruikt bij de totstandkoming van het werkstuk.

- 1 - W. <http://nl.wikipedia.org/wiki/Hoofdpagina>
- 2 - W. <http://www.google.nl>
- 3 - W. <http://www.tno.nl>
- 4 - W. <http://www.lofar.nl>
- 5 - W. <http://www.wired.com>
- 6 - W. http://www.convexoptimization.com/dattorro/sensor_network_localization.html