



Verhoging van energie-efficiency bij intensieve glastuinbouw productiesystemen

Ontwikkeling van high-tech sensorsystemen voor monitoring en besturing van energiezuinige kassen: Fibre Bragg glasvezelsensoren

J. Balendonck¹, H.J.J. Janssen¹, H.F. de Zwart¹, L. Schriek², P. Toet², R.A. Bezemer²
en M.N.A. Ruijs³

Rapport GTB-1392

1. Wageningen-UR Glastuinbouw, 2. TNO, 3. LEI Wageningen UR

Referaat

Wageningen UR Glastuinbouw en TNO hebben onderzoek uitgevoerd naar toepassing van Fibre Bragg glasvezelsensoren in de glastuinbouw om met hoge ruimtelijke dichtheid temperatuur en luchtvochtigheid te meten. De sensoren zijn ingebouwd in een experimentele behuizing en onder praktische omstandigheden in de 2SaveEnergykas in Bleiswijk geëvalueerd. De sensoren blijken ongeveer dezelfde prestaties te hebben als bestaande draadloze elektronische sensoren. Daarmee kunnen ze ingezet worden om een gedistribueerd meetnetwerk te vormen. Daarmee kunnen telers meer ruimtelijke informatie over de luchtvochtigheid krijgen. Ze kunnen dan bij een gemiddeld hogere RV telen in perioden waarin de verwarming wordt gebruikt. Het systeem geeft dan vroegtijdig aan of ergens in de kas kans is op condensatie en dientengevolge een hoger risico op ziekten. Vuistregel is dat elke %-punt verhoging van de luchtvochtigheid ongeveer 3.5% energie of 1 m³ aardgas equivalenten aan energiebesparing zal opleveren. Naast energiebesparing levert investeren in een gedistribueerd meetnet ook een economisch voordeel op. Een ander voordeel is dat glasvezelsensornetwerken tegen weinig meerkosten uitgebreid kunnen worden tot grotere oppervlakten en met andere sensortypes. Met glasvezelsensoren in kassen is echter nog weinig onderzoeks- en geen praktijkervaringen opgedaan. Meer onderzoek is nog nodig om tot een praktijkrijp systeem te komen.

Abstract

Wageningen UR Greenhouse Horticulture and TNO conducted a study on the application of Fibre Bragg optic sensors to measure temperature and relative humidity in greenhouses at high spatial density. Sensors, incorporated in an experimental enclosure, were evaluated under practical conditions in a greenhouse at Bleiswijk (NL). Their performance appeared to be similar to that of existing wireless electronic sensors. In order to save energy when using their heating, growers may so obtain relative humidity at higher spatial density and grow at a higher average humidity level. Sensors indicate at an early stage whether there is condensation and consequently a higher risk on diseases somewhere in the greenhouse. Rule of thumb is that every percent increase in the humidity will yield about 3.5% of energy or 1 m³ natural gas equivalents. In addition to energy saving, investing in a distributed monitoring network also has an economic advantage. Another advantage is that fiber-optic sensor networks can be extended to larger areas and with other sensor types at little more costs. However, little research and no practical experience is gained with fiber optic sensors in greenhouses. More research is still needed in order to arrive at a system ready for practice.

Rapportgegevens

Rapport GTB-1392

Projectnummer: 3742208600

Disclaimer

© 2016 Wageningen UR Glastuinbouw (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk, T 0317 48 56 06, F 010 522 51 93, E glastuinbouw@wur.nl, www.wageningenUR.nl/glastuinbouw. Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen UR Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

F +31 (0)10 522 51 93

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	9
2	Materiaal en Methode	11
2.1	Fibre Bragg Grating sensoren	11
2.2	Proefopzet en aanpak	11
2.3	Pakket van eisen en ontwikkeling meetset	12
2.3.1	Eisen Fibre Bragg sensoren en meetsysteem	12
2.3.2	Eisen elektronische sensoren en meetsysteem	14
2.3.3	Eisen behuizingen voor experimentele meetset	15
2.3.4	De opbouw, fabricage en montage van de sensorbehuizingen	16
2.4	Kalibraties	19
2.4.1	Kalibratie Fibre Bragg sensoren initieel	19
2.4.2	Gelijkheidstest elektronische sensoren	20
2.4.3	Vergelijking Fibre Bragg en elektronische sensoren	21
2.4.4	Kalibratie elektronische sensoren	22
2.5	Metingen in de kas	23
2.5.1	Meetopstelling in de kas	23
2.5.2	Plaatsing van het meetsysteem in de kas	24
3	Meetresultaten	29
3.1	Kalibraties	29
3.1.1	Kalibratie Fiber Bragg sensoren	29
3.1.2	Gelijkheidstest elektronische sensoren	31
3.1.3	Kalibratie elektronische sensoren achteraf (Wageningen UR Bleiswijk)	34
3.1.4	Individuele correctie elektronische sensoren	39
3.2	Metingen in de kas	42
3.2.1	Meting 1: Globale vergelijking (26 jul. t/m 6 sept.)	42
3.2.2	Meting 2a: Glasvezel eenzijdig ingeklemd (8 sept. – 27 okt.)	48
3.2.3	Meting 2b: FBG data na correctie voor looptijd (9 t/m 26 sept.)	52
3.2.4	Evaluatie nauwkeurigheid FBG sensoren	56
4	Analyse	61
4.1	Energiebesparing door een gedistribueerd meetgrid	61
4.2	Business cases en economische analyse	63
4.2.1	Economische parameters	64
4.2.2	Economie	65
4.2.3	Gevoeligheidsanalyse	65
5	Discussie	67
6	Conclusie	71
	Literatuur	73
	Bijlage 1 Specificaties elektronische sensoren	75

Samenvatting

Dit rapport beschrijft het onderzoek uitgevoerd binnen het werkpakket C3 in het jaar 2015. Binnen dit werkpakket is door Wageningen-UR en TNO glasvezeltechnologie onderzoek uitgevoerd naar de toepassing van Fibre Bragg glasvezeltechnologie als basis voor de ontwikkeling van nieuwe sensoren voor de glastuinbouw welke een zeer hoge meetdichtheid kunnen waarborgen. Naast tests in een klimaatkamer werd een systeem onder kasomstandigheden getest en geanalyseerd. De meetdata werden gebruikt in een simulatiestudie om (virtueel) het klimaat te regelen en de mogelijke energiebesparing te bepalen. Daarnaast werd economische haalbaarheid van een concreet eindgebruiker product onderzocht. De concrete resultaten voorzien voor het werkpakket C3 waren:

- Een "recept" voor temperatuur en vochtigheidssensoren op basis van Fibre Bragg technologie en nauwkeurigheid onder gedefinieerde omstandigheden.
- De nauwkeurigheid van de glasvezelsensoren onder praktische omstandigheden in een kas en praktische aanbevelingen.
- Een overzicht van de mogelijkheden voor toepassing in klimaatregeling en gevolgen voor energiebesparing/efficiency.
- Business case voor inzet glasvezelsensoren in kassen.

Samenwerking in TO2 project

De projectleiding van dit werkpakket lag bij Wageningen UR Glastuinbouw. Hierbij is kennis ingebracht met betrekking tot tuinbouwproductiesysteem ontwerp, gewas- en gewas fysiologische kennis, energiesysteemkennis kassystemen, uitvoering van kasexperimenten, monitoring met elektronische sensornetwerken en simulatie van kasklimaat en energiegebruik. TNO heeft de specificaties, keuzes voor de ontwikkeling van een vochtsensor op basis van de Fibre Bragg systematiek uitgevoerd. Vervolgens zijn kalibraties en duurtests uitgevoerd in klimaatcellen van de glasvezelsensoren. In samenwerking met Wageningen UR Glastuinbouw is een prototype glasvezelmeetsysteem voor temperatuur en luchtvochtigheid met 20 meetposities gerealiseerd. Dit systeem is geïnstalleerd in een kascompartiment in Bleiswijk, waarvan de meetdata verzameld is. In gezamenlijkheid zijn de data analyses uitgevoerd, en is de praktische toepassing van de Fibre Bragg sensoren geëvalueerd o.a. in vergelijking met de bestaande elektronische draadloze sensoren. Er is een business case opgesteld voor glasvezelnetwerken in kassen. Het LEI Wageningen UR heeft daartoe de economische analyse van een uiteindelijk Fibre Bragg meetsysteem voor kassen uitgevoerd.

Glasvezelsensoren: Fibre Bragg Gratings

Optische sensoren die zijn gebaseerd op het Fibre Bragg Grating (FBG) principe worden al lange tijd gebruikt om fysische parameters zoals temperatuur en rek te meten. Een FBG is een raster in een glasvezel dat een bepaalde golflengte van het ingestraalde licht van een op de fiber aangesloten lichtbron reflecteert. Omdat de glaseigenschappen veranderen met de temperatuur is de fiber intrinsiek gevoelig voor temperatuur, en door temperatuurveranderingen in de omgeving zal het raster axiaal meer of minder uitgerekt worden. Daardoor verandert de golflengte van het gereflecteerde licht. Het verschil in golflengte is dan een maat voor de axiale uitrekking van de FBG, en daarmee gerelateerd aan de omgevingsfactoren. Door toepassing van speciaal ontworpen coatings of andere mechanische constructies op de FBG kan de uitrekking ook gevoelig gemaakt worden voor andere parameters zoals relatieve luchtvochtigheid (RV), vocht of chemische bestanddelen, en kunnen verschillende sensoren worden gerealiseerd. Een belangrijk voordeel van FBG sensoren is de mogelijkheid tot multiplexing. Hierdoor is het mogelijk om verschillende omgevingsparameters te meten op meerdere posities op één glasvezelkabel. Om dit te bereiken, moeten de specifieke coatings daarvoor op elk op een apart raster op de fiber worden aangebracht. Op de FBG's voor dit project is een vochtgevoelige coating aangebracht om relatieve vochtigheid te kunnen meten in de kas. Deze coating is ontwikkeld in eerdere projecten. De uitrekking blijkt bijna lineair afhankelijk te zijn van de RV.

Onderzoek aanpak

Het onderzoek is uitgevoerd in een aantal stappen. De eerste stap betrof het opstellen van een pakket van eisen voor het sensornetwerk en duurtest sensoren. Als doelspecificatie voor de sensoren onder praktijkomstandigheden is gedefinieerd een bereik voor temperatuur van 0...45 °C met ΔT : 0.1 °C en voor RV van 35 ...98% met ΔRV : <3% en een responstijd van 1...5 min.

Daarna is een meetset met 20 glasvezelsensoren ontwikkeld en samen gebouwd in een geventileerde behuizing met bestaande draadloze elektronische sensoren (AgriSensys) als referentie. Vervolgens zijn beide meetsystemen gekalibreerd. De elektronische sensoren ook na afronding van de proef met een mini-kalibrator (Rotronic HC2S, speciaal voor temperatuur- en luchtvochtigheidsmeting, met een recente gecertificeerde kalibratie (29-10-2015) met een nauwkeurigheid van 0.3, 0.4 en 0.5% bij respectievelijk RV=34, 50, en 80% (allen bij 24°C) en met een onzekerheid van 0.1°C in de temperatuurmeting.

De test van het meetsysteem is uitgevoerd met een groentegewas (tomaat) in een van de experimentele kassen (2SaveEnergykas) van Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk. Deze kas heeft ongeveer 3000 m³ inhoud met een oppervlak van 500 m². Deze innovatieve onderzoekskas is voorzien van een dubbel kasdek, een doorlopende nokluchting en een extra verwarmingsondernet. De buisrail is dubbel uitgevoerd waardoor het mogelijk is de kas met lage watertemperaturen te verwarmen. Verder heeft de kas een buitenluchtaanzuiging als ontvochtigingssysteem. De sensoren zijn opgehangen in twee rijen van 5 sensoren en op 2 hoogten. De sensoren hebben gemeten in twee perioden, in de zomer en in het vroege najaar tussen juli en oktober 2015.

Tijdens de eerste meetsessie is gebleken dat er twee storende effecten in het testsysteem voor de glasvezel sensoren op traden. Op de eerste plaats is gebleken dat tijdens de praktijkmetingen de fibrelementen onder voorspanning waren ingeklemd tussen de twee bevestigingspunten. Bij de kalibratie was deze voorspanning er niet en waar deze wel ontstaan is, is niet bekend. Het gevolg was dat de kalibratie niet meer valide bleek. De sensoren zijn vervolgens maar met één inklemming bevestigd. Op de tweede plaats was het glasvezelmeetsysteem met extra lange glasvezels verbonden met de centrale lichtbron. Deze lengte was niet gebruikt tijdens de kalibratie, waardoor een looptijdscorrectie noodzakelijk bleek voor de sensoren in de praktijkmeting. Deze is uitgevoerd door op één meetdag de temperatuur van de elektronische sensoren als referentie te gebruiken voor de correctie. Vervolgens is de tweede meetsessie in het najaar gebruikt om de werking en nauwkeurigheid van de sensoren te valideren.

Nauwkeurigheid van de glasvezelsensoren

In de analyse is gekeken naar de nauwkeurigheid van de glasvezelsensoren waarbij de gekalibreerde elektronische sensoren als referentie zijn gebruikt. Het is gebleken dat de elektronische sensoren alvorens die in een klimaatregeling gebruikt worden, moeten worden gecontroleerd op werking, maar liefst ook gekalibreerd. Om de sensoren als referentie in dit onderzoek te gebruiken zijn deze individueel gekalibreerd en gecorrigeerd voor temperatuur met een lineaire correctie, en voor RV met een 2^{de} orde correctie. Na kalibratie kwamen alle T-waarden binnen een band van 0.3°C rondom de referentie temperatuur te liggen, en alle RV-waarden binnen een band van 0.8% rondom referentie RV. Rekening houdend met een nauwkeurigheid van de kalibrator kon voor de elektronische sensoren een absolute meetnauwkeurigheid van van $\pm 0.4^\circ\text{C}$ en $\pm 1.3\%$ aangehouden worden over het gehele bereik.

Tijdens de tweede meetperiode, na correctie van de data voor looptijd, bleken de verschillen tussen de glasvezelsensoren en elektronische sensoren te liggen in de orde van $\pm 1.2^\circ\text{C}$ en $\pm 5\%$, waarbij alleen de vergelijking is gemaakt in de periode dat er nagenoeg geen dynamische verschijnselen in de kas waren. De onzekerheid voor de FBG metingen (in absolute zin) ligt daarmee in de orde van $\pm 5.3\%$ en $\pm 0.9^\circ\text{C}$, welke veel groter is dan de gewenste doelnauwkeurigheid. De conclusie is dat de gebruikte vergelijkmethode niet geschikt is om met de gewenste nauwkeurigheid een goede vergelijking te maken.

Een directe vergelijking tussen de FBG en elektronische sensoren leert dat over het hele bereik de verschillen binnen de $\pm 0.8^\circ\text{C}$ en $\pm 4\%$ blijven. De algemene indruk bestaat daarmee dat de FBG sensoren ongeveer dezelfde prestatie hebben als de gecorrigeerde ES sensoren.

Simulatie klimaatregeling

Met het doel bij gebruik van een gedistribueerd meetnet van RV en T sensoren het energiebesparingspotentieel te bepalen is een simulatie van een klimaatregeling gedaan.

Een gedistribueerd meetgrid op zichzelf levert geen energiebesparing op. Het energetisch voordeel van zo'n meetnet kan alleen worden behaald wanneer de nauwkeurigere informatie over de luchtvochtigheid wordt gebruikt om bij een gemiddeld hogere luchtvochtigheid te telen tijdens de perioden waarin de verwarming wordt gebruikt.

Telers zijn beducht voor condensatie op het gewas en zorgen er daarom voor dat de luchtvochtigheid in de kas niet te hoog wordt. In verreweg de meeste kassen kan die luchtvochtigheid niet anders geregeld worden dan door de ramen en/of het energiescherm op een kier te zetten. In koude perioden van het jaar zal de temperatuur door het openen van ramen en/of energiescherm onder de gewenste ondergrens zakken en zal de verwarming aan of hoger worden gezet om het warmteverlies dat met het kieren van ramen of schermen gepaard gaat te compenseren.

Het aanhouden van een hogere luchtvochtigheid vermindert het energieverbruik dat met de vochtbeheersing gemoeid is langs twee wegen. In de eerste plaats neemt de gewasverdamping af bij een toenemende luchtvochtigheid en in de tweede plaats neemt het (voelbaar) warmteverlies per eenheid afgevoerd vocht af. Als vuistregel kan gesteld worden dat elke %-punt verhoging van het RV-setpoint in een moderne (onbelichte) glasgroententeelt ongeveer 3.5% energie of 1m³ aardgas equivalenten aan energiebesparing oplevert.

Business Case en economische haalbaarheid

Tot slot is de economische haalbaarheid van sensornetwerken in kassen beoordeeld met het doel energie besparingen te realiseren. Uit simulatieberekeningen blijkt dat een gedistribueerd meetnet voor temperatuur en RV economisch interessant is voor zowel de elektronische als de glasvezelsensor. Het is echter onzeker of de veronderstelde energiebesparing kan worden behaald. Uit voorgaande berekeningen blijkt dat een lagere RV setpoint verhoging (teler wil minder risico lopen) de energiebesparing verkleint en economisch sterk doorwerkt in het saldo van opbrengsten en kosten. Bij 2.5% energiebesparing schommelt het saldo bij de glasvezelsensor rond het break-even point.

Bij de economische analyse is van een basissituatie uitgegaan met 10% energiebesparing (3%-punt RV setpoint stijging t.o.v. 85% RV). Twee bedrijfstypen qua energieverbruik: 30 m³/m² en 40 m³/m² (een onbelichte teelt) zijn meegenomen.

Investeren in een gedistribueerd meetnet van temperatuur en RV levert behalve een energiebesparing ook een economisch voordeel op. Met de glasvezelsensor in kassen zijn echter nog weinig onderzoeks- en geen praktijkervaringen opgedaan, zoals bij de elektronische sensor. Toepassing in veeleisende omgevingen, zoals defensie en de olie- & gasindustrie, is bekend, maar er is nog geen aanpak om beschadiging van sensoren en fibers tegen te gaan bij het installeren en weer verwijderen van de glasvezelsensor bij teeltwisseling. Dit voordeel is daarom nog afhankelijk van veel aannames. Het geschatte voordeel is in deze experimentele opstelling ongeveer 1000 €/ha groter bij een meetsysteem met draadloze elektronische sensoren dan met de huidige glasvezelsensoren. Dit is gebaseerd op het feit dat draadloze elektronische sensoren in vergelijking met glasvezelsensoren lagere jaarkosten van de investering en lagere jaarlijkse arbeidskosten bij teeltwisseling hebben. Daarbij wordt opgemerkt dat een meetnet met glasvezelsensoren tegen weinig meerkosten kan worden uitgebreid tot grotere oppervlakte en met andere sensortypes. Draadloze sensoren bieden dus in economisch opzicht, maar ook uit oogpunt van praktische uitvoerbaarheid op dit moment een gunstiger perspectief dan een meetnet met glasvezelsensoren. Echter, bij doorontwikkeling en uitbreiding van de glasvezeltoepassingen wordt dit voordeel kleiner en zou deze beoordeling opnieuw gemaakt moeten worden.

1 Inleiding

De Glastuinbouw streeft naar een verdere verduurzaming op het gebied van de energievoorziening en optimaal gebruik van alle hoofd- en reststromen gekoppeld aan energieopwekking. Binnen de topsector Tuinbouw en Uitgangsmaterialen ligt de nadruk sterk op de vermindering van het absolute energiegebruik en optimalisatie van de beschikbare energie bij het gewasproductieproces. De laatste jaren is daarbij een duidelijke afname van de warmtebehoefte en verbetering van de energie efficiëntie gerealiseerd. Door de implementatie van technieken die warmteverliezen verminderen, de terugwinning van latente en voelbare warmte bij de ontvochtiging én maximale benutting van het beschikbare zonlicht zijn kasproductiesystemen mogelijk die minder dan 50% van de energie voor warmte opwekking vereisen dan enkele decennia geleden.

De sterke vermindering van het warmteverbruik is mede gerealiseerd door het gebruik van lage temperatuur verwarmingssystemen in combinatie met luchtverdeelsystemen, door het verlagen van de latente warmteverliezen en door te produceren bij hogere luchtvochtigheden. Hierdoor zijn er meer risico's op klimaatongelijkheden met betrekking tot temperatuur maar met name luchtvochtigheid. Het is bekend dat klimaatongelijkheden m.b.t. temperatuur en luchtvochtigheid extra risico's opleveren in relatie tot met name schimmelziekten (bijvoorbeeld Botrytis) en opbrengstderving tot resultaat hebben. Een verdere optimalisatie van de ruimtelijke klimaatbeheersing biedt enerzijds mogelijkheden tot risicobeperking en aan de andere kant een nog verdere verbetering van de energie-efficiëntie. De huidige generatie klimaatregelininstallaties is niet ontworpen om eventuele ongelijkheden weg te nemen. Dat komt voornamelijk omdat het de installaties ontbreekt aan gedistribueerde nauwkeurige meting van klimaatfactoren (temperatuur en luchtvochtigheid) en aan alternatieven voor de besturing van het klimaat.

Dit TO2 samenwerkingsproject benadert bovengenoemde problematiek langs drie hoofdlijnen (werkpakketten), elk op een cross over tussen twee of drie van de Topgebieden Tuinbouw en Uitgangsmaterialen (T&U), Energie en High Tech Systems and Materials (HTSM). De cross over met de topsector Energie(C1) loopt via het onderzoek naar duurzame opwekking van energie uit hernieuwbare biogene reststromen en maximale benutting van de restproducten. Op het snijvlak van T&U, Energie én HTSM (C2) vindt een eerste verkenning plaats rond de inzet van dunne film PV. De cross over met HTSM (C3) vindt plaats via de ontwikkeling van high-tech sensorsystemen voor monitoring en besturing van energiezuinige kassen. De kernvraag bij deze problematiek (C3) is: "Welke potentie heeft een gedistribueerde nauwkeurige meting van klimaatfactoren op het gebied van de haalbare energiebesparing in combinatie met een aangepaste besturing van het klimaat?"

Dit rapport beschrijft het onderzoek uitgevoerd binnen het werkpakket C3 in het jaar 2015. In dit werkpakket wordt door Wageningen-UR en TNO glasvezeltechnologie onderzocht op de technische haalbaarheid als meetsysteem voor temperatuur en luchtvochtigheid in kassen. Naast duurtests in een klimaatkamer wordt een systeem onder kasomstandigheden getest en geanalyseerd. De meetdata worden gebruikt in een simulatiestudie om (virtueel) het klimaat te regelen en de mogelijke energiebesparing op basis van het concept van de "wandelede meetbox" te bepalen. Daarnaast wordt economische haalbaarheid van een concreet eindgebruiker product onderzocht. De concrete resultaten voorzien (in 2015) voor werkpakket C3 zijn:

- Een "recept" voor temperatuur en vochtigheidssensoren op basis van Fibre Bragg¹ technologie en nauwkeurigheid onder gedefinieerde omstandigheden.
- De nauwkeurigheid van de glasvezelsensoren onder praktische omstandigheden in een kas en praktische aanbevelingen.
- Een overzicht van de mogelijkheden voor toepassing in klimaatregeling en gevolgen voor energiebesparing/efficiency.
- Business case voor inzet glasvezelsensoren in kassen.

¹ Een Fiber Bragg Grating (FBG) bevat een raster in een glasvezel dat een bepaalde golflengte reflecteert. Als het raster wordt uitgerekt, verschuift de golflengte van het gereflecteerde licht. De verschuiving is een maat voor de rek die op de FBG wordt uitgeoefend. In combinatie met speciaal ontworpen coatings of andere mechanische constructies kunnen sensoren worden gerealiseerd voor temperatuur en luchtvochtigheid, maar ook andere grootheden zoals druk en versnelling. (Naar TNO, Lun Cheng, <https://www.tno.nl/aandachtsgebieden/industrie/semiconductor-equipment/industrial-instrumentation/s-werelds-kleinste-sensoren-op-fiber-en-chip/>).

Binnen het werkpakket C3 hebben drie deelnemende TO2 partijen onderzoek uitgevoerd naar de toepassing van Fibre Bragg glasvezeltechnologie als basis voor de ontwikkeling van nieuwe sensoren voor de glastuinbouw welke een zeer hoge meetdichtheid kunnen waarborgen. De test van het meetsysteem is uitgevoerd met een groentegewas (tomaat) in een van de experimentele kassen (VenlowEnergyKas) van Wageningen UR en de potentiële energiebesparing is gebaseerd op simulatiemodellering met bestaande tools van Wageningen UR.

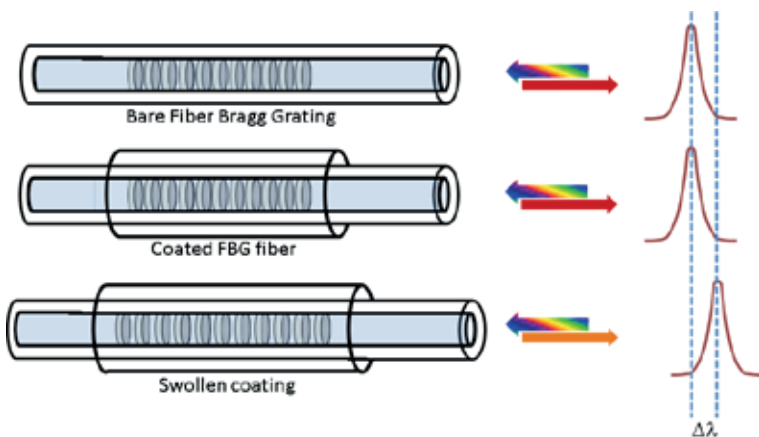
Wageningen UR Glastuinbouw heeft de projectleiding van het werkpakket gedaan. Hierbij is kennis ingebracht met betrekking tot tuinbouwproductiesysteem ontwerp, gewas- en gewas fysiologische kennis, energiesysteemkennis kassystemen, uitvoering van kasexperimenten, monitoring met elektronische sensornetwerken en simulatie van kasklimaat en energiegebruik. TNO heeft de specificaties, keuzes voor de ontwikkeling van een vochtsensor op basis van de Fibre Bragg systematiek uitgevoerd. Vervolgens zijn kalibraties en duurtests uitgevoerd in klimaatcellen van de glasvezelsensoren. In samenwerking met Wageningen UR Glastuinbouw is een prototype glasvezel meetsysteem voor temperatuur en luchtvochtigheid met 20 meetposities gerealiseerd. Dit systeem is geïnstalleerd in een kascompartiment in Bleiswijk, waarvan de meetdata verzameld is. In gezamenlijkheid zijn de data analyses uitgevoerd, en is de praktische toepassing van de Fibre Bragg sensoren geëvalueerd o.a. in vergelijking met de bestaande elektronische draadloze sensoren. Uiteindelijk zijn eisen opgesteld voor een nieuw kasconcept. Verder is een voorstel uitgewerkt voor een proof-of-principle in een kas in het IDC Energie en is een business case opgesteld voor glasvezelnetwerken in kassen. Het LEI Wageningen UR heeft daartoe de economische analyse van een uiteindelijk Fibre Bragg meetsysteem voor kassen onderzoek uitgevoerd.

2 Materiaal en Methode

2.1 Fibre Bragg Grating sensoren

Optische sensoren die zijn gebaseerd op het Fibre Bragg Grating (FBG) principe worden gebruikt om fysische parameters zoals temperatuur en rek te meten. Er wordt al geruime tijd onderzoek gedaan naar dit principe, maar praktische en commerciële toepassingen zijn er pas sinds enkele jaren.

Een FBG is een raster (= "grating") in een glasvezel dat een bepaalde golflengte van het invallende licht reflecteert. Door veranderingen in de omgeving, zoals temperatuur, vocht, of chemische bestanddelen wordt het raster axiaal iets uitgerekt. Daardoor verschuift de golflengte van het gereflecteerde licht, zie figuur 2.1. Deze uitrekking van de FBG levert een langere golflengte (een verschuiving van blauw in de richting van rood).



Figuur 2.1 De werking van een Fibre Bragg Grating (glasvezel sensor).

De golflengteverschuiving is een maat voor de axiale uitrekking van de FBG, en daarmee gerelateerd aan de omgevingsfactoren. Door toepassing van speciaal ontworpen coatings of andere mechanische constructies op de FBG kan de uitrekking gevoelig gemaakt worden voor een gewenste specifieke parameter, zoals temperatuur of luchtvochtigheid. Zo kunnen verschillende sensoren worden gerealiseerd.

Een belangrijk voordeel van FBG sensoren is de mogelijkheid tot multiplexing. Hierdoor is het mogelijk om verschillende omgevingsparameters te meten op verschillende posities op één fiber. Om dit te bereiken, moeten de verschillende coatings op verschillende gratings op de fiber worden aangebracht.

Op de FBG's voor dit project is een vochtgevoelige coating aangebracht om relatieve vochtigheid te kunnen meten in de kas. Deze coating is ontwikkeld in eerdere projecten. De uitrekking blijkt bijna lineair afhankelijk te zijn van de relatieve vochtigheid.

2.2 Proefopzet en aanpak

De werkzaamheden in het werkpakket C3 zijn uitgevoerd opgedeeld in een aantal deeltaken:

a) Opstellen van pakket van eisen voor het sensornetwerk en duurtest sensoren.

Er worden specificaties opgesteld voor toepassing van T en RV metingen in een vochtige kasomgeving. Voor de temperatuur wordt een commercieel verkrijgbare glasvezel T-sensor geselecteerd en eventueel aangepast. De luchtvochtigheidsensoren worden op basis van de Fibre Bragg systematiek ontworpen en in een klimaatkamer getest op betrouwbaarheid (doorlooptijd 3 maanden).

b) Metingen in de kas

Op basis van de specificaties wordt door TNO een lichtbron/meetinstrument in combinatie met glasvezelkabel gerealiseerd met in totaal 20 sensor meetposities. Installatie in een kas met een groentegewas van Wageningen UR in Bleiswijk. Er wordt geteeld bij een hoge luchtvochtigheid.

Ter controle en vergelijking worden (naast de standaard meetbox), draadloze sensoren (AgriSensys) voor RV en T geplaatst. Opslag (minuutbasis) en analyse van data van alle glasvezelnetwerk sensoren, de standaard meetbox, additionele gekalibreerde en draadloze sensoren (doorlooptijd 3 maanden).

c) Simulatie klimaatregeling

Simulatie van een klimaatregeling voor het gebruikte testgewas op basis van de gerealiseerde meetdata met toepassing van het concept van de "wandelende meetbox". Bepaling van de mogelijke energiebesparing binnen vooraf vastgestelde ideale setpoints (doorlooptijd 3 maanden).

d) Economische haalbaarheid sensornetwerken in kassen

Opstellen van een business case voor het gebruik van de glasvezelsensoren in kassen. Presentatie aan een groep geïnteresseerde bedrijven (doorlooptijd 2 maanden).

2.3 Pakket van eisen en ontwikkeling meetset

De metingen in de kas zullen er primair op gericht zijn om de doelspecificaties van de sensoren onder praktijkomstandigheden te testen (bereik T: 0...45 °C, RV: 35 ...98%, ΔT : 0.1 °C, ΔRV : <3%, Responstijd: 1...5 min. In de praktijkkas zullen daartoe de metingen (T, RV) van de FBG vergeleken worden met de metingen van de elektronische sensoren, waarbij tevens van de klimaatcomputer data van de standaard meetbox, de instraling en de instellingen van de klimaatcomputer worden meegenomen. De verzamelde data en informatie zal gebruikt worden voor de data analyse, en als input in de deeltaken c en d. Bij de uitvoering van de proeven in de kas zijn er een aantal additionele onderzoeksvragen waarop we antwoord zouden willen krijgen.

- Wat gebeurt er met de sensoren als deze natslaan? Is het drogen een reversibel proces, en hoe lang duurt dit? Vooralnog verwachten we dat het proces reversibel is. De duur van een eventuele "black-out" zal afhangen van de omgevingsfactoren.
- Wat is het effect op de sensoren van beregening, nutriënten, gewasbeschermingsmiddelen en b.v. zwavel?
- Hoe is de kalibratie van de sensoren op de lange termijn (drift)?
- Als de temperatuur in de kas langere tijd boven de 35 graden uitkomt, heeft dat effect op de metingen?
- Moeten de sensoren met een behuizing in de kas geplaatst worden, of kunnen deze onbehuist geplaatst worden? We weten dat de sensoren beschermd moeten worden tegen mechanische invloeden, vandaar dat deze in een behuizing worden geplaatst. Een andere vraag is of er invloed is van instraling op de metingen. Daartoe zullen een aantal sensoren een tijdje ook zonder stralingsafscherming getest worden.
- Wat is het effect op de meting (T) bij instraling overdag en 's nachts bij uitstraling naar een heldere hemel?
- Meetdata worden verzameld voor onderdeel 3) de simulatie. Aan welke eisen moet de meetopstelling voldoen om een goede dataset aan te kunnen leveren?

2.3.1 Eisen Fibre Bragg sensoren en meetsysteem

Er zullen 20 temperatuur sensoren en 20 relatieve luchtvochtigheid sensoren gebouwd worden. Deze sensoren zullen in paren ingezet worden op 20 meetlocaties een testkas (2Save Energy kas) in Bleiswijk. Standaard hangt in deze kas t.b.v. klimaatbeheersing één meetbox, ongeveer in het centrum van de kas. De sensoren zullen ingebouwd worden in een geventileerde behuizing, die voorzien zal worden van glasvezelconnectoren. Deze behuizingen worden met standaard glasvezels en connectoren met elkaar verbonden. De afstand tussen de meetlocaties in de kas zal variabel moeten zijn tussen ca. 1-5 m. In een praktijkkas gaat het om afstanden tot 20 meter.

Tabel 2.1

Specificaties voor glasvezelsensoren in kassen.

Kop	Initieel (haalbaarheid bekend)	Overeengekomen (haalbaarheid onbekend) ²⁾	Optimaal (wensen uit telers praktijk)
Aantal meetlocaties	20	20	Minimaal 10 per ha.
Aantal sensoren	1T + 1RV per meetlocatie	1T + 1RV per meetlocatie	1T + 1RV per meetlocatie
RV [%]	90...95	35 ...98 ¹⁾	<20>98 ³⁾
Δ RV [%]	3	<3	<1...2
T [°C]	15...35	0...45	0 ...>45
Δ T [°C]	0.5	0.1	0.1
Responstijd [min]	10	1...5	1...5 ⁴⁾

RV = Relatieve luchtvochtigheid [%], T = Temperatuur [°C], Δ = onnauwkeurigheid

Opmerkingen:

1. De ondergrens op 35% gesteld. Bij volledig geopende ramen zal de RV niet snel onder de 50% komen, en daarmee is deze keuze redelijk veilig.
2. De haalbaarheid zal blijken uit de sensor kalibratie.
3. Voor bestaande sensoren wordt vaak een andere nauwkeurigheid afgegeven bij hoge luchtvochtigheden boven de 95%.
4. Mogelijk heeft een geventileerde behuizing invloed op de response time. Klimaatregelcomputers rekenen doorgaans met een cyclustijd in de orde van 1 minuut. Het is daarom wenselijk dat sensoren een responsietijd hebben van op zijn minst diezelfde orde. Het hebben van 1 meting per minuut is daarom wenselijk.

De uitleesunit voor glasvezelsensoren (interrogator) en meet PC moet in een geconditioneerde meetruimte staan (een relatief constante T en RV). De afstand tussen de interrogator en de eerste meetbox mag niet meer bedragen dan 50 meter. Van de meetruimte naar de testkas komen 4 patchcords (A,B,C, D) met een lengte van 50 meter te liggen, die enigszins beschermd moeten worden tegen knikken. Er mag niet overheen gelopen of gereden worden, idealiter worden ze tenminste 1m boven de grond gemonteerd.

Voor de meetruimte is de bedrijfsruimte in de reguliere proefkas van Wageningen UR-Glastuinbouw gekozen, die direct grenst aan de 2SaveEnergyKas. Daar is ter plekke een voorziening voor 220V (2 stopcontacten) en internet. De twee kassen zijn gescheiden d.m.v. een 2 meter breed pad. Onder het pad ligt een mantelpijp, waardoor de glasvezelkabels getrokken kunnen worden. Ter plekke is ook een tafel nodig om de interrogator en de PC op te zetten.



Figuur 2.1 Fibre Optic Interrogator (FOI).

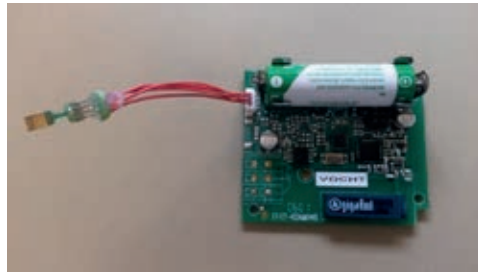
Temperatuur invloeden op de interrogator zullen worden bijgehouden door een athermische FBG naast de interrogator te plaatsen. Als de athermische FBG een golflengteverandering laat zien, dan is dat te wijten aan temperatuurinvloeden op de interrogator (geteste respons van de athermische FBG < 70 pm tijdens temperatuurverloop van 0...85°C). Indien de RV,T niet contact genoeg is, moet een voorziening daarvoor getroffen worden. Voorlopig gaan we er vanuit dat aan de condities voldaan wordt, maar er zal ter plekke ook een extra WV-sensor opgehangen worden om het klimaat te monitoren.

Voor aansluiting van de sensoren zullen 4 kanalen gebruikt worden van de interrogator (FOI). Op ieder kanaal kunnen 5 minimeetboxen (met 10 sensoren: 5 T en 5 RV) aangesloten worden. Het voorgestelde meetbereik kan zonder multiplexer, op één interrogator.

2.3.2 Eisen elektronische sensoren en meetsysteem

In de meetkastjes worden 20 draadloze, elektronische RV-T-sensoren van Wireless Value B.V. gebruikt als referentie². Daarvoor moeten in de kas, of daar direct in de buurt, een basisstation en een mini-PC geplaatst worden. We kiezen ervoor om het basisstation en de mini-PC in de bedrijfsruimte te plaatsen, direct nabij de interrogator. We gaan er vanuit dat de sensoren in de 2SaveEnergyKas van daaruit bereikbaar zijn, uit ervaring met soortgelijke opstellingen in het Gezonde Kas project in Straelen. We zullen dit testen, werkt het niet, dan moet het basis station in de 2SEK gezet worden, en moet een extra kabel voor internet mogelijk door de mantelpijp getrokken worden. Dit laatste heeft niet de voorkeur omdat de twee kassen galvanisch gescheiden zijn i.v.m. bliksemveiligheid, en daarvoor uitsluitend glasvezel voor de verbindingen is gebruikt.

² Deze sensoren worden uitdrukkelijk voor het onderzoek geplaatst, en zullen niet in een praktijk systeem gebruikt worden. Binnen het onderzoek zijn Wireless Value sensoren (AgriSensys) toegepast met RV,T-sensoren van Sensirion SHT75 met verhoogde nauwkeurigheid voor toepassing in de glastuinbouw.



Figuur 2.2 Standaard draadloze sensor voor RV,T voor controle van het klimaat interrogator, losse print van RV,T sensor voor in de meetkastjes en een opengewerkt basisstation (Wireless Value B.V.).

2.3.3 Eisen behuizingen voor experimentele meetset

Het is bekend dat stilstaande lucht in bestaande meetboxen een meetfout genereert door instraling van de zon (overdag) en door uitstraling naar de koude hemel ('s nachts). Daarom worden de sensoren in een mini-box geplaatst welke voorzien is van een kleine ventilator. De behuizing zal zo ontworpen worden dat met een eenvoudige aanpassing de glasvezelsensoren ook zonder instralingsafscherming getest kunnen worden.

De vorm van de mini-meetbox is bij voorkeur cilindrisch, dit om de eventuele opwarming niet richting selectief te maken. Om praktische redenen is echter voor gekozen om een rechthoekige versie te maken, mede omdat er ook de elektronische sensoren in moeten. De minimale afmetingen zijn gekozen om de minimale buigradius van de glasvezel te waarborgen.

In iedere mini-meetbox wordt een glasvezel T-sensor en een RV-sensor geplaatst (FBG-sensor). Naast deze glasvezelsensoren komen ook de referentie sensoren in de mini-meetboxen (ontdaan van hun blauwe behuizing, alleen het printje). Beiden glasvezelsensoren kunnen zo vergeleken worden met de geventileerde elektronische sensoren (WV-sensor). Ook dienen de elektronische sensoren in het experiment ervoor om te controleren of de glasvezelsensoren nog in hun werkgebied zitten, en geen overlap in banden vertonen. Verder zijn we er zo zeker van dat de RV,T wordt gemeten op nagenoeg dezelfde locatie.

De kastjes worden verbonden met standaard glasvezelkabels, en worden ook voorzien van een voeding voor de ventilatoren. De voedingskabel zal tevens dienen als ophangdraad voor de kastjes in de kas, aan bijvoorbeeld de gewasdraden, of andere infrastructuur in de kas. Er moeten minimaal 2 gaten beschikbaar zijn voor fiber optische connectoren (8.5 mm diameter). Op de sensorbehuizing komen 2 (in/uitgang) connectoren voor de glasvezels (FC/APC) en een (of twee) connectoren voor de voeding van de ventilator. De gaten voor optische doorvoer hoeven niet per definitie tegenover elkaar geplaatst te worden.



Figuur 2.3 Glasvezel connectoren en standaard glasvezelkabel.

De behuizing zal deelbaar gemaakt worden (3 delen) zodat de glasvezelsensoren eenvoudig gemonteerd, en de kabels aangesloten kunnen worden.

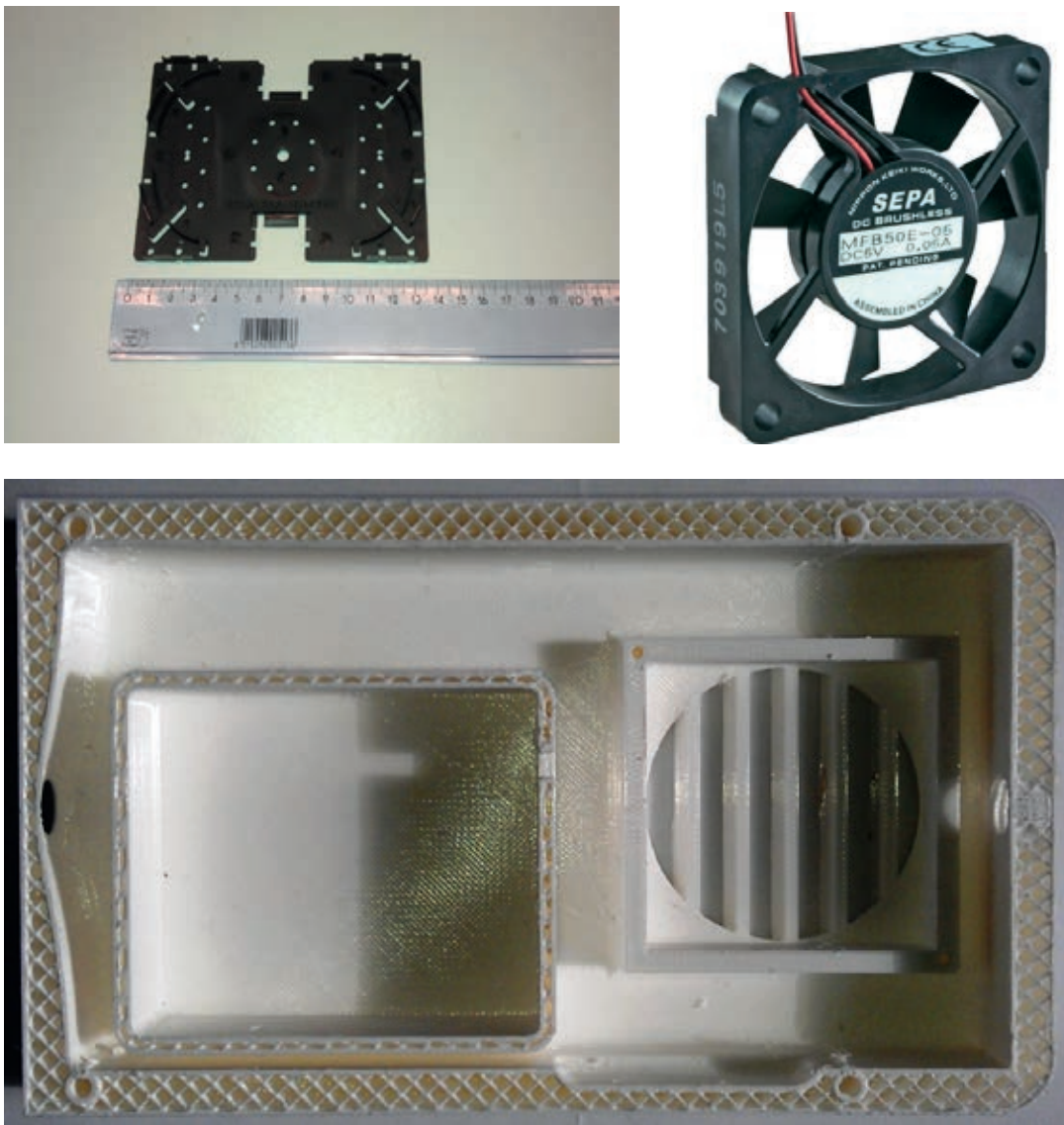
In de praktijk kunnen de glasvezels opgerold worden tot een diameter van minimaal 5 cm, zonder dat dit de werking van de glasvezel aantast. Echter niet onbeperkt. Iedere scherpe buigradius beïnvloedt de transmissie en meerdere buigradii tellen qua optisch verlies bij elkaar op. Een diameter van 32 mm mag maar ongeveer 1 keer per kanaal voorkomen voor waarborging van een correcte uitlezing³

De behuizing wordt niet meegenomen in de kalibratie metingen

2.3.4 De opbouw, fabricage en montage van de sensorbehuizingen.

Er zijn 20 behuizingen gemaakt. In elke behuizing komen 2 glasvezelsensoren (T en RV), een elektronische sensor, en een ventilator.

De fabrikant van de FBG sensor levert ook frames (lascassette) waarin de glasvezel op gewikkeld kan worden. Dit frame is als basis genomen voor het ontwerp van de behuizing (zie Figuur 2.4).



Figuur 2.4 Standaard montage cassette voor fiber glas sensoren (links boven), de toegepaste mini-ventilator (rechts boven), en de 3D geprinte behuizing met holle wanden voor thermische isolatie (onder).

³ bron: <http://www.focenter.com/Fiber%20Optic%20Center%5Ccorning%5Cdatasheets%5Csmf-28.pdf>

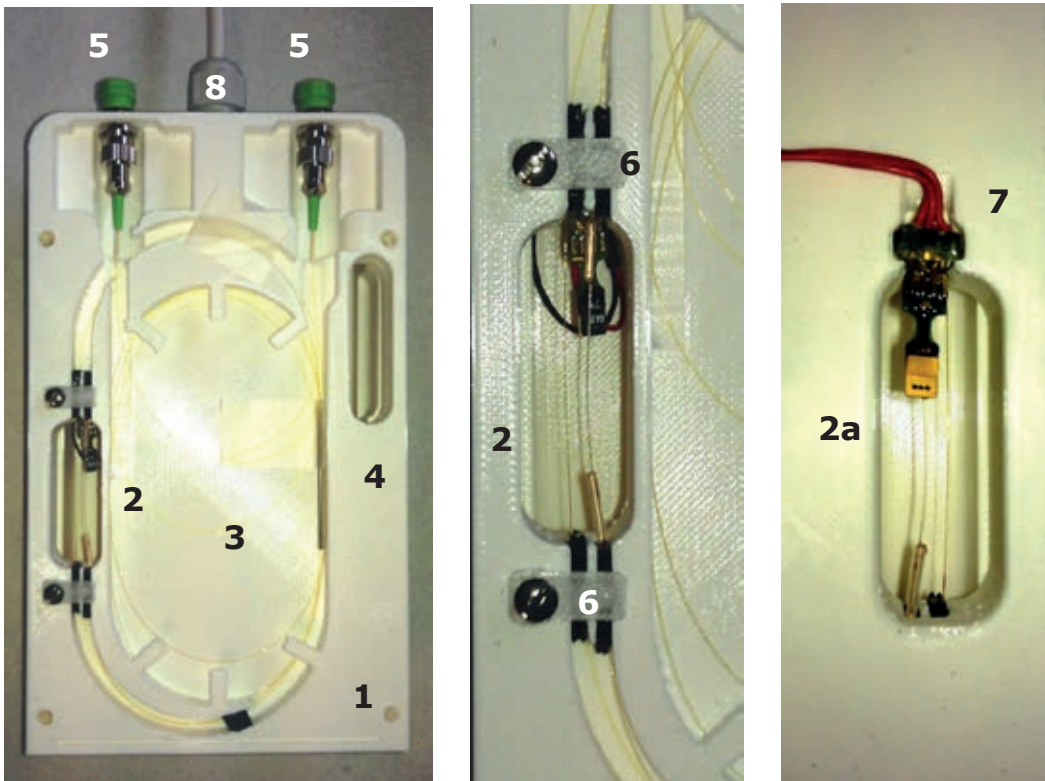
De glasvezelsensoren zijn op een basisplaat gemonteerd. Deze basisplaat kan dan eenvoudig extern van de mini-meetbox gehanteerd en gekalibreerd worden. Op deze basisplaat zit aan de voorkant de fiber opgewikkeld en wel zodanig dat de beide FBG-sensoren door het zgn. meetkamertje lopen. In dit meetkamertje zit ook de elektronische T,RV sensor voor de referentie meting. De basisplaat zit opgesloten tussen een voor- en een achterdeksel. In de achterdeksel zit een mini ventilator (een borstelloze DC-motor, type: SEPA: MFB50-12, 12V/60mA) die voor de benodigde gescheiden luchtstromen zorgt. De primaire luchtstroom loopt door het meetkamertje langs de sensoren. De secundaire luchtstromen door de voor en achterdeksel zorgen voor het afvoeren van de ingestraalde warmte. De ventilator zit in de uitstroomopening waardoor de te bemeten luchtstroom niet door de ventilator opgewarmd wordt. De beide FBG-sensoren en de elektronische T,RV sensor zitten op een onderlinge afstand van minder dan 5 mm, samen met een luchtstroom van $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (gemeten met een anemometer) en de goede isolatie tegen instraling wordt een goede meetconditie gecreëerd.

De behuizing is in 3D print techniek uitgevoerd (Phenovation B.V., Wageningen), die het mogelijk maakt om holle wanden te creëren (zie Figuur 2.4, onder). Daarvoor wordt biologisch afbreekbaar Poly Lactide (PLA) gebruikt met een zeer lage warmte capaciteit en daardoor een hoge graad van warmteisolatie. Door daarbij de vulfactor (dichtheid) bij het printen laag te kiezen ontstaat een behuizing met een zeer hoge isolatiewaarde, vergelijkbaar of zelfs beter is dan van schuim-PVC dat in commerciële meetboxen gebruikt wordt. Om een snelle doorlooptijd van de productie te garanderen zijn de behuizingen op in parallel op 3 printers geproduceerd. Het printproces is niet 100% vormvast, waardoor er soms na montage enkele kleine kiertjes bleven tussen de deksels en de basisplaat.

Montage sensoren in behuizing

De fibers zijn gevoelig, en montage (de fiber moet ge-spliced worden) is daarom specialistenwerk. TNO heeft daartoe de sensoren zelf in de door Wageningen UR Glastuinbouw aangeleverde basisplaten gemonteerd. De T en RV sensoren worden ieder ontdaan van een connector en daar aan elkaar gespliced. De afstand tussen de FBG's moet ongeveer 20 meter blijven i.v.m. het behouden van de optische weglengte zoals de sensoren gekalibreerd zijn. Ook maakt deze afstand het mogelijk dat dit systeem later in een praktijkkas geplaatst kan worden. De overtollige glasvezellengte wordt in de behuizing opgerold. De beide FC/APC connectoren worden aan de binnenzijde van een FC/APC koppelbus aangesloten. De beide sensoren worden ieder spanningsvrij en contactvrij in de behuizing gemonteerd. Na montage wordt de reflectie van de FBG's bekeken om zeker te zijn dat er geen defect is opgetreden aan de sensoren en de splice kwaliteit in orde is.

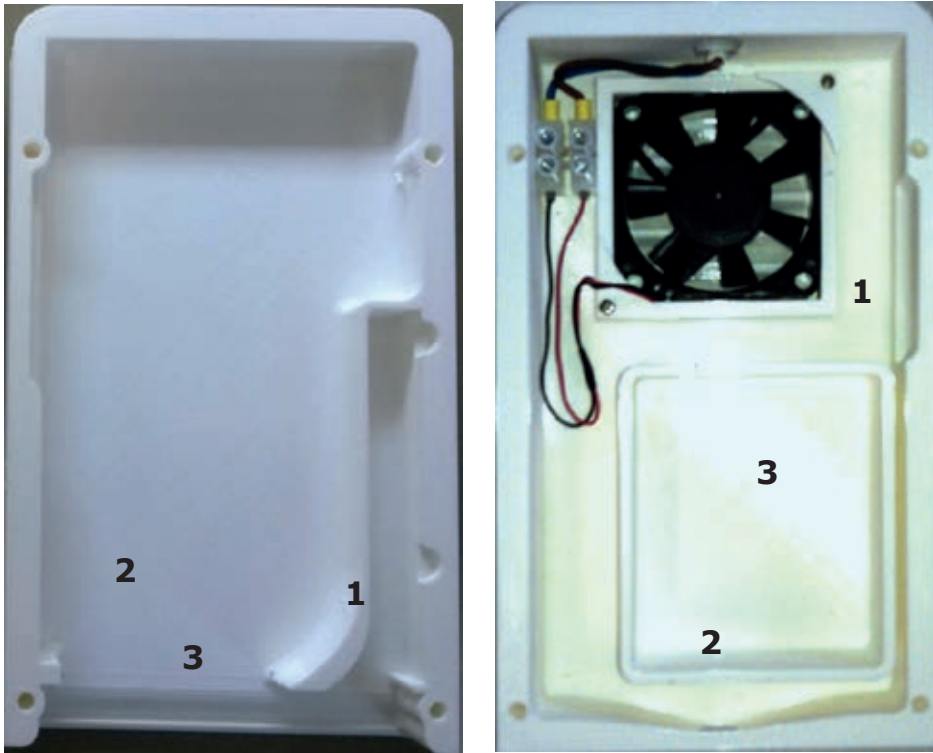
Na de montage van de glasvezelsensoren zijn de basisplaten door Wageningen-UR voorzien van de elektronische sensor printjes, de voor- en achterdeksels met de ventilatoren en de bekabeling van de voeding (zie Figuur 2.5 en 2.6).



Basisplaat (1)

Meetkamer (2) met twee FBG-sensoren en de elektronische T,RV-sensor. Achterzijde meetkamer (2a). Ruimte (3) om de fiber op te wikkelen en te lassen (splice). Door-stroom-opening om instralingswarmte af te voeren (4). Connectoren voor de in- en uitgaande fiber (5). Klemmen en rubber blokjes om de glasfiber te fixeren (6). Elektronische T,RV-sensor Sensirion SHT74 (7). Voedingskabel voor de ventilator, tevens ophangkabel (8).

Figuur 2.5 Basisplaat met opgewikkelde fiber, FBG-sensoren en elektronische T,RV-sensor.



Voordeksel

Apart inlaatkanaal voor de meetkamer (1). Luchtinlaat voor koeling (2). Sleuven voor montage luchtfilter (3).

Achterdeksel

Ventilator, Sepa 12V 60mA (1). Luchtinlaat voor koeling (2). Afgeschermd kamer voor WV print (3).

Figuur 2.6 Voor- en achterdeksel met de luchtinlaatkanalen.

2.4 Kalibraties

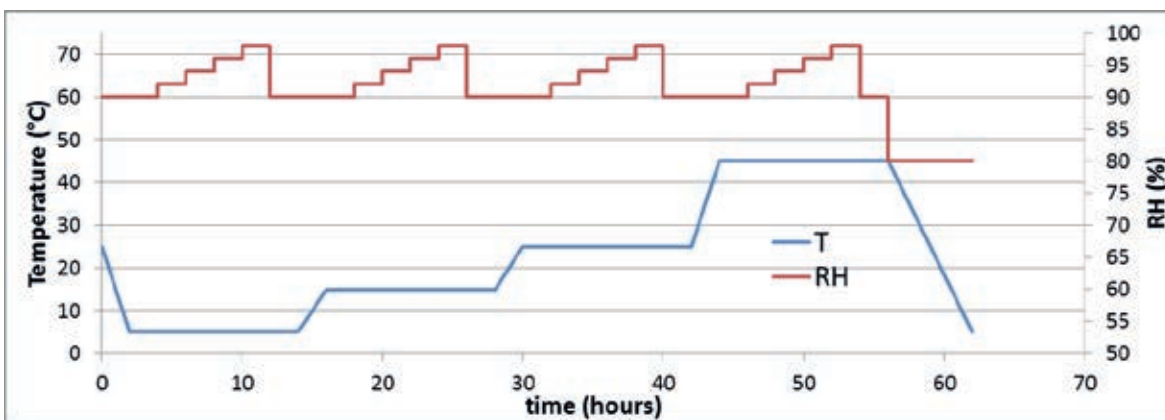
2.4.1 Kalibratie Fibre Bragg sensoren initieel

De 24 FBG sensoren zijn na montage op de basisplaat en voor de kasproef door TNO (Eindhoven) gekalibreerd. In detail wordt dit beschreven in een TNO-rapport (Boersma, *et al.* 2015).



Figuur 2.7 Montage en kalibratieopstelling bij TNO.

Deze kalibratie voor temperatuur en relatieve vochtigheid was voorafgaand aan de installatie in de kas. Daartoe zijn ze op een rek bevestigd dat als geheel in de ESPEC ARL-0680 klimaatkamer is geplaatst. De klimaatkamer reguleert temperatuur T en vochtigheid RH via een luchtstroom. Mede daardoor zijn T en RH in de kamer homogeen binnen resp. 0.5°C en 1%. De nauwkeurigheid van de instellingen van de klimaatkamer is resp. 0.5°C en 2%. Figuur 2.7 toont het in de klimaatkamer geprogrammeerde T- en RH-profiel dat is doorlopen bij kalibratie.



Figuur 2.8 Profiel van temperatuur en luchtvochtigheid in de klimaatkamer.

De fibers zijn via optische connectoren verbonden met de MicronOptics SM130 interrogator, die de golflengteverschuivingen voor iedere FBG registreert en opslaat.

2.4.2 Gelijkheidstest elektronische sensoren

De WV-sensoren zijn voor de proef niet gekalibreerd, maar alleen onderling vergeleken op gelijkheid door Wageningen UR. Wireless Value adviseert voor gebruik een gelijkheidstest voor de sensoren uit te voeren waarmee onderlinge kleine offset-verschillen bepaald en gecorrigeerd kunnen worden. Daarmee kunnen bij toepassingen van meerdere sensoren in de kas, kleine onderlinge klimaatverschillen gedetecteerd worden. Echter, met deze test kan niet de absolute nauwkeurigheid van de sensoren gewaarborgd worden. Zonder een absolute kalibratie, kan alleen uitgegaan worden van de standaard specificatie en kalibratie van de Sensiron SHT75 sensor zelf (zie Bijlage 1).

De elektronische sensoren zijn wel na de kasproef gekalibreerd, om zodoende alsnog nauwkeurigere absolute meetwaarden te hebben om naast de Fiber Bragg sensor data te kunnen leggen (Zie §2.4.3 en §2.4.4).

Voor de tweede meetsessie in het najaar is bij de "her-kalibratie" van de glasvezelsensoren gebruik gemaakt van de temperatuur meetwaarden van de elektronische sensoren om de looptijdcorrectie uit te kunnen voeren. Op dat moment werkten de elektronische sensoren via de standaard kalibratie. Omdat deze data gebruikt is, kan dit in principe invloed hebben op de nauwkeurigheid van de fiber sensoren, omdat achteraf de meetwaarden vergeleken zijn met absoluut gekalibreerde elektronische sensoren.



Figuur 2.8 Sensorprintjes in doos voor gelijkheidstest (links: eerste test in grote doos; rechts: tweede test in 3 dozen).

Voor de gelijkheidstest zijn de WV-sensoren in een geïsoleerde doos bij elkaar geplaatst in het lab in Wageningen. De sensorprintjes zijn in de doos tussen papieren blaadjes gelegd om kortsluiting te voorkomen (Zie Figuur 2.8 links).

De sensoren zijn in eerste instantie een aantal dagen gevolgd (17 – 27 juni) door de doos op een relatief constante temperatuur en relatieve luchtvochtigheid te houden. De meetdata zijn individueel per 10 minuten gemiddeld en opgeslagen. Voor elke 10 minuten (in één hele dag) is voor RV en T de gemiddelde waarde over alle 20 sensoren bepaald. Tevens werd de afwijking van elke sensor t.o.v. die gemiddelde waarde bepaald. Ten slotte werd per sensor, over de gehele dag (6 x 24 meetwaarden) een offset-waarde bepaald. Als offset correctie zal de gemiddelde waarde genomen worden van alle gekozen meetdagen (minimaal 3 dagen). De offset waarden zullen bij de dataverwerking achteraf gebruikt of verwerkt worden. De data vanuit de mini-PC zullen als ruwe meetwaarden opgeslagen worden (1x per minuut).

Bij analyse van de data na de proef bleek dat de spreiding in de data weliswaar binnen de specificaties lag, maar dat deze onderling toch relatief groot was. Ook was er gedurende dag veel variatie te zien, mogelijk door verwarming of ventilatie in het lab, waardoor temperatuurgradiënten in de doos ontstaan kunnen zijn. Er is toen besloten om een tweede gelijkheidstest uit te voeren door de sensor elementen dichter bij elkaar zetten in een kleinere doos, door deze in enveloppen te plaatsen met het sensor element uitstekend boven de envelop (voor elektrische isolatie en betere gelijkheid). Vervolgens in deze kleine doos in een grotere doos gedaan, en deze doos is in een kunststofkast, midden in het lab gezet (vanaf 25 juni, ca. 13:00h, zie Figuur 2.8 rechts). De metingen zijn gelogd van 27 juni t/m 2 juli. De doos is toen op een relatief constante temperatuur gehouden (ca. 21 - 26°C) en relatieve luchtvochtigheid (ca. 49-55%).

2.4.3 Vergelijking Fibre Bragg en elektronische sensoren

De eerste proeven in de kas (juli-augustus) hebben laten zien dat de installatie (b.v. glasvezel lengten) en de behuizingen invloed kunnen hebben op de juiste kalibratie. De Fibre Bragg sensoren zijn vooraf alleen gekalibreerd met de basisplaat, zonder behuizing en zonder lange toevoer glasvezels. Om de invloed van de behuizing en de lange toevoer glasvezel mee te nemen is het belangrijk om alle 20 meetboxen compleet met FBG en elektronische sensoren te kalibreren en vergelijken.

Vergelijking in klimaatkast met compleet meetsysteem

Na de kasproef (week 44, 26-30 oktober) zijn de Fibre Bragg sensoren en de elektronische sensoren en het complete meetsysteem met alle 20 complete meetkastjes in een grote klimaatkast geplaatst (Weisskast 1, PCM I, Weiss Technik Nederland BV, Wageningen-UR, Unifarm). Het doel was om vergelijkende metingen uit te voeren bij de volgende RV,T-instellingen, resp. 40, 65, 90, 92, 94, 96, 98 % en 5, 15, 25 en 45°C.

Uiteindelijk is gebleken dat de klimaatkast regeling voor RV en T niet voldoende stabiel was om een kalibratie uit te voeren. Wel is de opstelling gebruikt om de looptijd correctie factor te bepalen (zie § 3.2.1.).



Figuur 2.9 Complete meetset in klimaatkast.

2.4.4 Kalibratie elektronische sensoren

De vergelijking in de klimaatkast is uiteindelijk mislukt omdat de klimaatkasten de verschillende temperatuur en relatieve vochtigheid instelwaarden over het gewenste bereik niet voldoende stabiel konden handhaven. Om de FBG-sensoren achteraf toch te controleren op nauwkeurigheid zijn de WV-sensoren daarom aan het einde van de proef alsnog alleen gekalibreerd (19 en 24 november 2015).

Dit is gebeurd met een nauwkeurige kalibrator/mini-klimaatcel (HydroGen, Rotronic, Wageningen UR Bleiswijk), en een gekalibreerde RV,T sensor (Rotronic HC2S, gekalibreerd op 29-10-2015 bij RV=34, 50, en 80% met resp. een onzekerheid van 0.3, 0.4 en 0.5%, allen bij 24°C met een onzekerheid van 0.1°C). Deze kalibrator heeft maar een kleine cilindervormige meetkamer, waar de 20 sensoren wel in kunnen tegelijkertijd, maar niet de sensorprintjes. Daartoe zijn de sensorelementen via een verlengkabel aan de printjes verbonden zodat de 20 sensorelementen wel tegelijkertijd in de meetkamer pasten.



Figuur 2.10 Kalibratieopstelling met Rotronix mini-kalibrator (links) en 20 stuks elektronische sensoren gemonteerd in deksel samen met de Rotronic referentie sensor (rechts).

Het doel was om metingen uit te voeren bij de volgende RV instellingen van 35 tot 100% in stappen van 5% bij een constante temperatuur van 25°C. En vervolgens voor temperatuur van 5 tot 45°C in stappen van 5°C bij constante RV van 70%.

2.5 Metingen in de kas

2.5.1 Meetopstelling in de kas

De sensoren zijn getest in de 2SaveEnergy kas in Bleiswijk met daarin een tomatengewas. Die heeft ongeveer 3000 m³ inhoud met een oppervlak van 500 m². Deze is voorzien van de volgende elementen:

- Een dubbel kasdek, bestaande uit een helder glas (buitenkant geplaatst), aan beide zijden voorzien van een Anti Reflectie coating. Daaronder is op een afstand van ca. 7 cm een diffuus Fclean film (ETFE) getrokken. De spouw werking moet zorgen voor een hoge isolatiewaarde, het diffuus licht zorgt voor een maximale spreiding van het zonlicht over het gewas en de anti-reflectie coatings zorgen voor een hoge lichttransmissie.
- Een doorlopende nokluchting om de montage van de ETFE film te vereenvoudigen. Hierdoor kan de film van kopgevel tot kopgevel in een keer worden ingebracht waarna het wordt opgespannen. In deze fase zijn de luchtramen nog wel voorzien van dubbelglas (4 x AR en 1 ruit is diffuus).
- Een extra verwarmingsondernet. De buisrail is dubbel uitgevoerd, waardoor het mogelijk is de kas met lage watertemperaturen te verwarmen, en het rendement van het ketelhuis toeneemt.
- Een buitenluchtaanzuiging als ontvochtigingssysteem, dat is gebaseerd op het gebruik van buitenlucht met naverwarming.



Figuur 2.11 2SaveEnergy kas (links) met een tomatengewas (juni 2015).

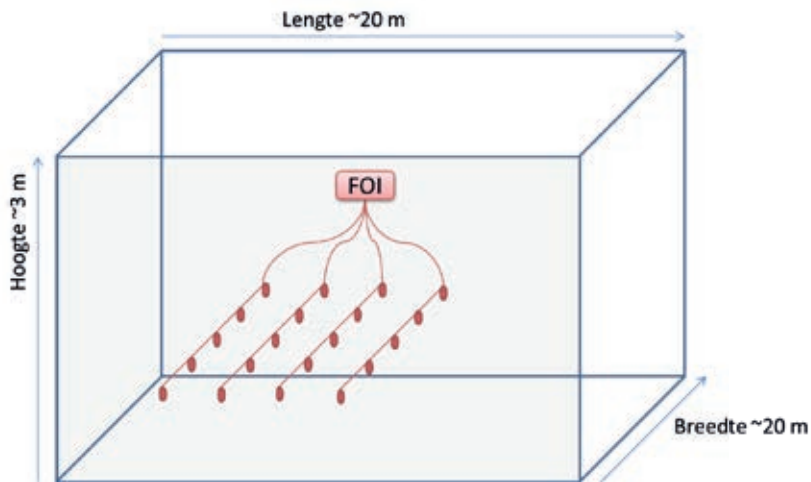
2.5.2 Plaatsing van het meetsysteem in de kas

In een kas kunnen de sensoren op verschillende wijze geplaatst worden. Het systeem zal in principe het meest gebruik maken van een stervormig netwerk, waarbij vanuit de interrogator (de centrale lichtbron), via een multiplexer, meerdere uitgaande glasvezels de kas in gaan. Elke glasvezel zal dan op vaste afstanden een meetbox bevatten (multi-drop). Een teler zal doorgaans in rijen willen meten, en mogelijk op verschillende hoogten. Figuur 2.12. geeft een aantal voorbeelden van mogelijke lay-outs (a, b en c) voor de 2SaveEnergyKas met 20 meetlocaties. Voor praktijkkassen is de opstelling in het horizontale vlak (H) het meest relevant. In onderzoekkassen kan de opstelling in het verticale vlak (V) of een mengvorm daarvan (M) ook interessant zijn. Omdat voor deeltaak c (simulatie) ruimtelijke data van de kas nodig is, is gekozen om de sensoren op te hangen volgens het gespreide principe (Figuur 2.12c)

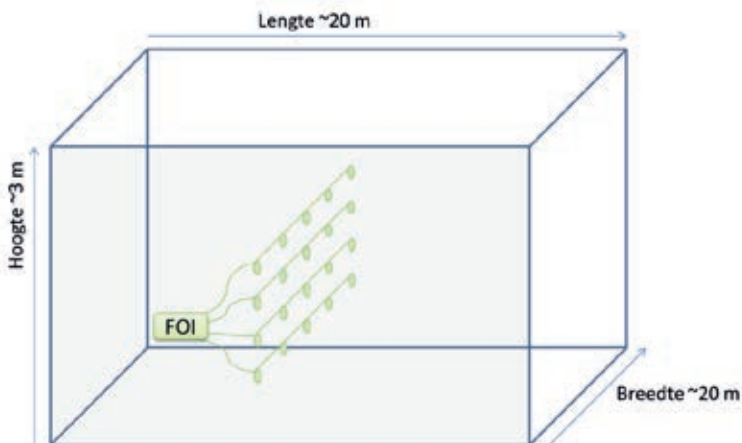
Met een goed gekozen afstand tussen de sensoren kan er op verschillende hoogten en locaties gemeten worden. De typische lengte tussen twee mini-meetboxen in een praktijkkas is 20 meter. De optische, geel ommantelde, kabels zijn verkrijgbaar in verschillende lengtes (zie Figuur 2.3). In de proeven in de kas in Bleiswijk zijn de minimeetboxen maximaal 5 meter uit elkaar geplaatst. Bij plaatsing op een kortere afstand dan 20 meter moet een te lange de glasvezelkabel opgebost worden met een diameter van ongeveer 15 cm zonder scherpe knikken (diameter > 5 cm).

In de kas is centraal een 12V voedingsapparaat opgesteld (bij een 220V aansluiting) waarmee de ventilatoren in de meetkastjes gevoed worden. De voedingskabels zijn aan elkaar verbonden met speciale "kroonsteentjes", en de meetkastjes zijn aan de voedingskabels opgehangen door deze met tie-wraps aan de verticale ophangstaven voor de teeltgoten te bevestigen. De glasvezel- en voedingskabels zijn verticaal naar beneden geleid en via de substraatgoot naar een centraalpunt achter in de kas geleid. Het ophangen en positioneren van de gemonteerde meetboxen is op 9 en 10 juli uitgevoerd (Figuur 2.13).

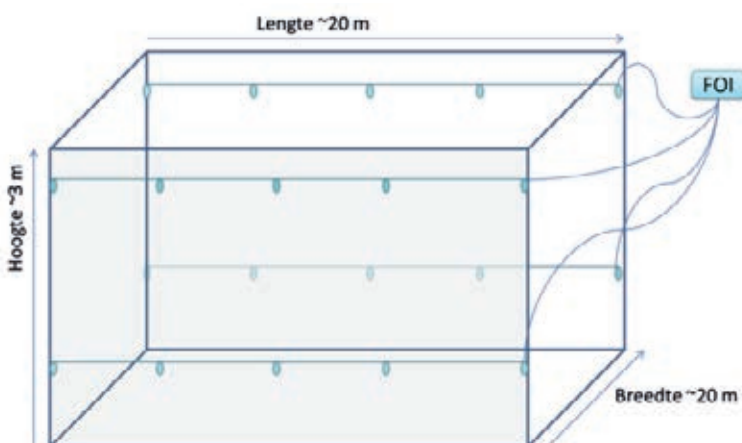
(H) Horizontaal vlak



(V) Verticaal vlak



Mengvorm (H+V)



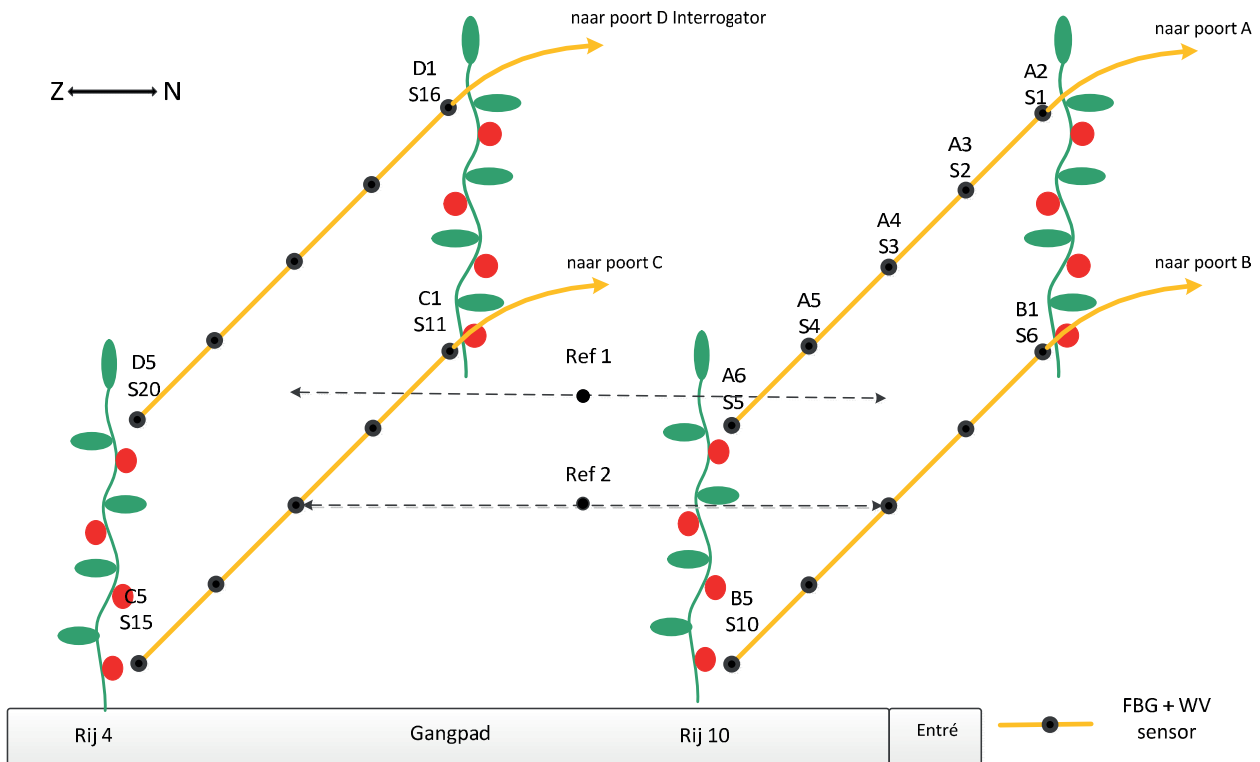
Figuur 2.12 Mogelijke lay-outs van het meetsysteem in de kas (FOI=Fiber Optic Interrogator + multiplexer).

In de kas zijn in de rijen 4 en 10 een set sensoren in de kop van het gewas gehangen, en ook sensoren onderin het gewas op ca. 75 cm boven de steenwol mat. Deze rijen zijn gekozen omdat die op voldoende afstand van de zijwanden staan. In de rij zijn de sensoren aan de metalen ophangstaven van de teeltgoten opgehangen. Er waren daarvoor 4 goede mogelijkheden. De vijfde sensor is wat dichterbij de 4^{de} sensor opgehangen (achter in de kas) dan de afstand tussen de sensoren op plaats 1...4. Voor de analyse en deeltaak simulatie, maakt dat niet uit, als de positie maar bekend is.



Figuur 2.13 Sensorkastjes opgehangen in de kas.

De FBG sensoren zijn ingedeeld in de vier strengen A, B, C en D. Elke streng is gekoppeld aan een poort van de Fiber Optic Interrogator (FOI), die daartoe een 4-voudige interne multiplexer heeft. Deze FOI zorgt voor de uitlezing van FBG sensoren. Voor grotere meetssystemen kan eventueel een externe multiplexer gebruikt worden met meerdere uitgangspoorten. In Figuur 2.14 wordt de meetopstelling in de kas schematisch weergegeven.



Figuur 2.14 Plaatsing van de sensoren in de 2save energy kas.

Voor referentie meting is elk FBG meetpunt voorzien van een draadloze elektronische sensor. Beide sensoren zijn gecombineerd in een geventileerde behuizing waardoor de meetomstandigheid voor de beide type sensoren volledig identiek is. Elke FBG sensor is gepaard met een elektronische sensor (Zie Tabel 2.2). S1...20 zijn de elektronische sensoren en A2...6 , B1...5 , C1...5 en D1...5 zijn de FBG sensoren.

De sensoren Ref 1 en Ref 2 zijn standaard geventileerde sensoren die gebruikt worden voor de klimaatregeling. Deze sensoren (Rotronix Hygro Clip 2) zijn gekalibreerd en worden ook meegenomen in de referentie meting.

Tabel 2.2

Gepaarde glasvezel (FBG) en elektronische (WV) sensoren.

Sensor		Naam								
WV	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
FBG	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5
WV	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
FBG	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5

De Interrogator (Micron Optics SM130) is geplaatst in de corridor van de aangrenzende kas en wordt uitgelezen door een meet-PC. Deze meet-PC zorgt ook voor de uitlezing van de draadloze sensoren en is gekoppeld aan het Wageningen UR netwerk. Binnen Wageningen URnet was deze PC bereikbaar met Remote Desktop.



Figuur 2.15 De meet PC en interrogator in de technische ruimte van de hoofd proefkas in Bleiswijk (midden). De vier patch-cords gaan door een mantelpijp, welke uitkomt in de 2SaveEnergyKas (links) en het basisstation voor draadloze communicatie gemonteerd daarboven (rechts).

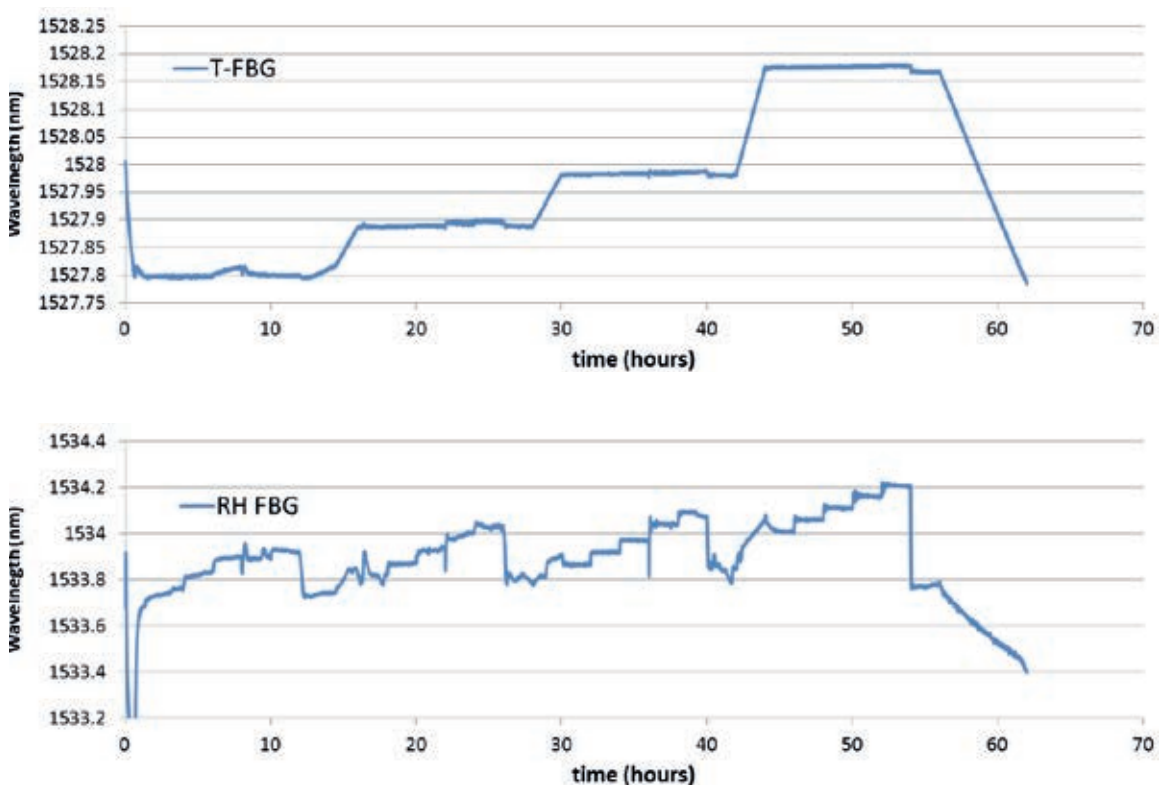
3 Meetresultaten

3.1 Kalibraties

3.1.1 Kalibratie Fiber Bragg sensoren

In de klimaatkamer

De respons van de FBGs op veranderende T en RH is tijdens een kalibratie in de klimaatkamer (TNO-Eindhoven) vastgelegd. Figuur 3.1 toont een representatieve meting van één van de FBGs (te vergelijken met het T- en RH-profiel in Figuur 2.8 in §2.4.1).



Figuur 3.1 Voorbeeld van de gemeten gereflecteerde golflengte over de tijd gedurende de kalibratie van een T-FBG en RH-FBG-paar.

De FBGs volgen de T en RH veranderingen heel goed. Enkele pieken zijn zichtbaar in de RH curve wanneer de temperatuur wordt gewijzigd, maar in de stabiele situatie treft dit niet op. De RH-FBG is gevoelig voor temperatuur, zoals bekend. Ook blijkt dat de T-FBG enigszins gevoelig is voor de vochtigheid. Hoewel dat geen sterke afhankelijkheid is, moet hiermee wel rekening worden gehouden. De relatie tussen golflengte en temperatuur heeft voor de T-FBG de volgende vorm:

$$\lambda = \alpha + \beta \times RH(\%)$$

Hierbij zijn α en β temperatuurafhankelijk:

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T$$

$$\beta(T) = \beta_0 + \beta_1 T$$

De gemeten golflengtes bij de verschillende T/RH-instellingen zijn hierop gefit. Tabel 3.1 geeft hiervan de resultaten: over alle FBGs de gemiddelde waarden en standaarddeviaties van α_1 , β_0 en β_1 . De waarden van α_0 zijn niet gegeven, want deze bevatten ook de initiële golflengte van de FBG. Deze zijn moeilijk te vergelijken, en voor de kalibratie niet relevant.

Tabel 3.1

Gemiddelde waarden van de parameters α_1 , β_0 , en β_1 voor de T-FBG's en de RH-FBG's.

Kop	T-FBG	RH-FBG
α_1 (pm/°C)	11.76 ± 0.62	28.1 ± 2.2
β_0 (pm/%RH) @ 0°C	1.48 ± 0.26	34.7 ± 2.2
β_1 (pm/%RH/°C)	-23.6 ± 5.1	-240 ± 23

In de kas t.o.v. elektronische sensoren

Bij de eerste experimenten met de fibers in de kas na installatie bleek er een aantal onverwachte verschillen te zijn tussen de temperaturen zoals gemeten door de FBGs en door de elektronische sensoren. Uit nadere inspectie bleek dat sommige fibers onder spanning in de behuizing waren gemonteerd, leidend tot een offset, onjuiste T- en RH-waarden en grote spikes in de gemeten temperatuur. Daarom is het fixatiemateriaal verwijderd (op 8 september), zodat de fibers vrij lagen. Bij een nieuwe set experimenten zijn de spikes afwezig.

Echter, de door de T-FBGs gemeten temperaturen waren te hoog en verschilden tot 25°C van elkaar, terwijl de temperatuurvariatie tussen de elektronische sensoren nooit groter was dan 2-3°C. Wel volgden de T-FBGs de temperatuurtrend heel goed. Ook de door de RH-FBGs gemeten vochtigheden vertoonden een grote variatie, met soms waarden van boven de 100%.

Uit nader onderzoek bleek een duidelijke correlatie tussen de positie van de FBG op de fiber en de golflengteverschuiving (zie §2.5.2 voor het aansluitschema van de fibers). Hierbij zijn de elektronische sensoren als referentie genomen. De FBG metingen leken een systematische fout te bevatten, die deels verklaard kon worden uit de afstandsverschillen tussen de interrogator en iedere FBG. Doordat de golflengteverschuiving van de FBGs zowel temperatuur als vochtigheid afhangen, is een correctie alleen te berekenen vanuit de ruwe data. Dat leidde tot een correctie in de golflengteverschuiving van 2,6 pm per meter fiberlengte. Tabel 3.2 geeft de bijbehorende fiberlengtes tussen iedere FBG en de interrogator.

Tabel 3.2

Offsetcorrecties en fiberlengtes per FBG-paar.

Meetbox nummer	lokatie	Lengte (m)	Golfengte correctie (pm)	Meetbox nummer	lokatie	Lengte (m)	Golfengte correctie (pm)
A1	Niet	gebruikt		C1	11	51,38	133,59
A2	1	45,67	118,73	C2	12	70,50	183,31
A3	2	66,76	173,58	C3	13	90,73	235,90
A4	3	86,49	224,88	C4	14	68,23	177,40
A5	4	111,22	289,17	C5	15	90,19	234,49
A6	5	134,27	349,35	C6	Niet	gebruikt	
B1	6	45,90	119,35	D1	16	46,90	121,94
B2	7	67,40	175,25	D2	17	67,78	176,23
B3	8	88,89	231,12	D3	18	86,47	224,82
B4	9	63,61	165,39	D4	19	108,01	280,82
B5	10	85,09	221,24	D5	20	130,76	339,98
B6	Niet	gebruikt		D6	Niet	gebruikt	

De precieze werkelijke fiberlengtes konden niet in de kas worden gemeten, maar wel geschat. Deze corresponderen goed met de berekende lengtes zoals in Tabel 3.2 gegeven.

3.1.2 Gelijkheidstest elektronische sensoren

Dagelijkse variaties in T en RV

De resultaten van de gelijkheidsmetingen worden gegeven in Tabel 3.3. De eerste test (19 - 25 juni) laat verschillen ten opzichte van het gemiddelde over de 20 sensoren zien van -0.32 tot $+0.24^{\circ}\text{C}$ (bij $T = 19-21^{\circ}\text{C}$), en $\pm 0.55\%$ (bij $RV = 45-55\%$). In de tweede test (27 juni - 2 juli) liggen deze variaties tussen -0.36 tot $+0.18^{\circ}\text{C}$. Deze verschillen zijn niet essentieel anders.

Tabel 3.3 A,B,C

Resultaten gelijkheidstest elektronische sensoren. De afwijkingen worden gegeven ten opzichte van het gemiddelde over alle 20 sensoren per sensor voor ΔT (3.3A) en ΔRV (3.3B) gemiddeld over een hele dag; en de gevonden maximale (MaxT en MaxRV) en minimale (MinT en MinRV) afwijking ten opzichte van het gemiddelde over alle 20 sensoren per sensor per dag (3.3C).

Dag (ΔT , °C)	17	19	20	21	22	24	27	28	29	30	1	2
S1	-0.10	-0.14	-0.13	-0.11	-0.10	-0.23	-0.10	-0.11	-0.10	-0.06	-0.04	-0.02
S2	0.11	0.05	0.07	0.07	0.09	-0.09	0.01	0.04	0.02	0.01	-0.02	-0.04
S3	0.20	0.19	0.19	0.18	0.20	0.05	0.16	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17
S4	0.24	0.20	0.20	0.21	0.21	0.16	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.12
S5	0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.15	-0.01	-0.04	-0.04	-0.01	0.00	0.03
S6	-0.06	-0.06	-0.04	-0.06	-0.06	-0.07	-0.05	-0.04	-0.03	-0.06	-0.07	-0.07
S7	0.07	0.05	0.04	0.03	0.04	-0.08	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	0.00
S8	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.13
S9	-0.19	-0.15	-0.12	-0.15	-0.16	-0.14	-0.12	-0.14	-0.15	-0.14	-0.14	-0.14
S10	0.17	0.17	0.18	0.15	0.15	0.17	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.11
S11	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.04	-0.02	-0.04	-0.07	-0.09	-0.07
S12	-0.12	-0.06	-0.03	-0.08	-0.10	0.02	-0.07	-0.06	-0.06	-0.08	-0.09	-0.07
S13	-0.03	-0.04	-0.07	-0.08	-0.07	-0.01	-0.04	-0.06	-0.06	-0.05	-0.04	-0.01
S14	0.04	0.03	0.02	0.05	0.05	0.08	-0.10	-0.01	-0.09	-0.21	-0.30	-0.36
S15	0.09	0.12	0.14	0.13	0.14	0.16	0.17	0.16	0.15	0.14	0.15	0.12
S16	-0.07	-0.04	-0.03	-0.01	-0.03	0.04	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03
S17	x	x	x	x	x	x	x	x	0.12	0.13	0.14	0.14
S18	-0.16	-0.10	-0.13	-0.12	-0.12	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01
S19	-0.07	-0.05	-0.07	-0.07	-0.06	0.04	-0.05	-0.06	-0.06	-0.02	0.01	0.00
S20	-0.32	-0.32	-0.35	-0.31	-0.31	-0.13	-0.13	-0.17	-0.13	-0.08	-0.02	-0.01
St.dev.							0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.12

Dag(Δ RV, %)	17	19	20	21	22	24	27	28	29	30	1	2
S1		-0.05	-----	-----	-0.01	0.61	0.07	-0.03	0.26	-0.21	-0.37	-0.32
S2		0.04			0.18	0.90	0.17	0.19	0.17	0.18	0.07	0.13
S3		-0.14			-0.04	0.57	-0.18	-0.18	-0.03	-0.26	-0.38	-0.37
S4		-0.27			-0.44	0.00	0.09	-0.01	0.16	-0.17	-0.11	0.05
S5		-0.55			-0.48	0.13	-0.30	-0.29	-0.16	-0.36	-0.45	-0.43
S6		0.43			0.30	0.09	0.21	0.13	0.20	0.08	0.13	0.28
S7		-0.20			0.00	0.44	0.06	0.03	0.18	0.05	-0.03	0.01
S8		-0.18			0.15	-0.14	0.05	0.06	0.01	0.06	-0.04	-0.07
S9		0.28			0.27	0.04	0.01	0.14	-0.01	0.17	0.16	0.11
S10		-0.25			-0.13	-0.25	-0.05	-0.09	-0.05	-0.11	-0.18	-0.18
S11		-0.14			0.00	0.17	0.00	0.18	-0.14	0.35	0.29	0.17
S12		0.21			0.38	-0.42	0.04	0.10	-0.02	0.13	0.10	0.03
S13		-0.24			-0.16	-0.55	-0.26	-0.20	-0.26	-0.20	-0.28	-0.39
S14		0.03			-0.13	-0.35	0.27	0.47	-0.16	0.99	1.28	1.34
S15		0.29			0.27	0.34	0.16	0.16	0.22	0.18	0.25	0.19
S16		-0.33			-0.33	-0.63	-0.33	-0.41	-0.33	-0.48	-0.49	-0.47
S17	x	x	x	x	x	x	x	x	0.14	0.37	0.44	0.38
S18		0.44			0.17	-0.25	0.04	0.04	-0.12	-0.01	0.08	0.03
S19		0.11			-0.01	-0.28	-0.03	-0.10	0.05	-0.28	-0.13	-0.18
S20		0.54			0.01	-0.43	-0.02	-0.19	0.06	-0.49	-0.34	-0.31
St. Dev .							0.17	0.20	0.17	0.34	0.40	0.40

Dag	Min T	Max T	Min RV	Max RV	Min RV*)	Max RV*)
17 juni	-0.32	+0.24				
19 juni	-0.32	+0.20	-0.55	+0.54		
20 juni	-0.35	+0.20				
21 juni	-0.31	+0.21				
22 juni	-0.31	+0.21	-0.48	+0.38		
24 juni	-0.23	+0.18	-0.63	+0.90		
27 juni	-0.16	+0.18	-0.40	+0.51	-0.40	+0.26
28 juni	-0.19	+0.11	-0.41	+0.47	-0.50	+0.29
29 juni	-0.19	+0.16	-0.52	+0.50	-0.36	+0.42
30 juni	-0.23	+0.17	-0.55	+0.99	-0.66	+0.43
1 juli	-0.31	+0.17	-0.52	+1.28	-0.55	+0.56
2 juli	-0.36	+0.17	-0.47	+1.81	-0.47	+0.39

Opmerkingen: x Sensor S17 is pas geïnstalleerd op 29 juni vanaf 12:40u.

0.99 meetwaarden lopen buiten 3 x Standaard Deviatie.

*) In de rechter twee kolommen zijn de minimale en maximale RV's weergegeven na uitsluiting van sensor S14 in de RV meting.

Offset factoren per sensor

In de volgende Tabel 3.4 zijn de offsetwaarden voor de sensoren weergegeven, bepaald als gemiddelde over de 6 meetdagen van 27 juni t/m 2 juli voor zowel T als RV. Voor sensor D14 zien we dat bij de RV de offset buiten de 3 x de standaard deviatie loopt ($P=0.99$) vanaf 30 juni (zie Tabel 3.3C). Dit betekent dat deze sensor duidelijk meer drift heeft dan de andere sensoren. Voor temperatuur bereikt deze sensor de 3 x SD grens op 2 juli. Voor de analyse van de offset waarden wordt deze sensor daarom buiten beschouwing gelaten. Voor temperatuur mogen we concluderen dat de offset binnen de $\pm 0.16^{\circ}\text{C}$ blijft. Voor RV blijft de offset variatie binnen de $\pm 0.42\%$.

Tabel 3.4

Offset factoren van de elektronische sensoren bepaald bij ca. $T=20^{\circ}\text{C}$ ($19-21^{\circ}\text{C}$) en $RV = 50\%$ ($45-55\%$).

Sensor	ΔRV (%)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Sensor	ΔRV (%)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
S1	-0.10	-0.07	S11	0.14	-0.06
S2	0.15	0.00	S12	0.06	-0.07
S3	-0.23	0.16	S13	-0.27	-0.04
S4	0.00	0.14	S14	0.70	-0.18
S5	-0.33	-0.01	S15	0.19	0.15
S6	0.17	-0.05	S16	-0.42	-0.02
S7	0.05	-0.01	S17	0.33	0.13
S8	0.01	0.13	S18	0.01	-0.01
S9	0.10	-0.14	S19	-0.11	-0.03
S10	-0.11	0.11	S20	-0.22	-0.09

Uit deze één-puntscontrole concluderen we dat de variaties tussen elektronische sensoren in ieder geval bij 20°C en 50% RV binnen de nauwkeurigheid specificatie liggen van de Sensirion sensoren (zie Bijlage 1). Met dienverstand dat mogelijk Sensor 14 een exemplaar is dat een grote drift over meerdere dagen vertoont. Deze controle is geen absolute kalibratie, daarom is ook een aparte absolute kalibratie over een groter bereik uitgevoerd na de metingen in de kas (zie §3.1.3).

3.1.3 Kalibratie elektronische sensoren achteraf (Wageningen UR Bleiswijk)

De resultaten van de absolute kalibratie (19 en 24 november uitgevoerd) van de elektronische sensoren zijn weergegeven in de volgende grafieken voor relatieve vochtigheid (Figuur 3.2) en temperatuur (Figuur 3.5).

In de grafiek met differenties zijn pieken te zien tijdens de overgangssituaties tussen de verschillende instelwaarden voor RV. Daarom zijn voor de metingen ook gemiddelde bepaald over de stabiele perioden tussen de transities. Deze waarden zijn opgenomen in de andere grafieken (links en rechtsonder)⁴.

In de grafiek 3.2 (linksonder) is te zien dat sensoren S4, S5, S6 een afwijkend gedrag vertonen. S5 lijkt een constant negatieve offset verschil te hebben van ca. -15% . S4 en S6 lijken voor RV defect te zijn. In de verdere analyse moeten deze sensoren voor RV in ieder geval buiten beschouwing gelaten worden. Verder zien we dat voor hoge RV's ($>80\%$) S18 een afwijkend gedrag vertoont. Boven de 95% loopt de sensor buiten de specificatie. Voor deze hoge RV's is S18 dus niet te gebruiken in de analyse. S4, S5, S6 en S18 worden daarom in de verdere analyses buiten beschouwing gelaten.

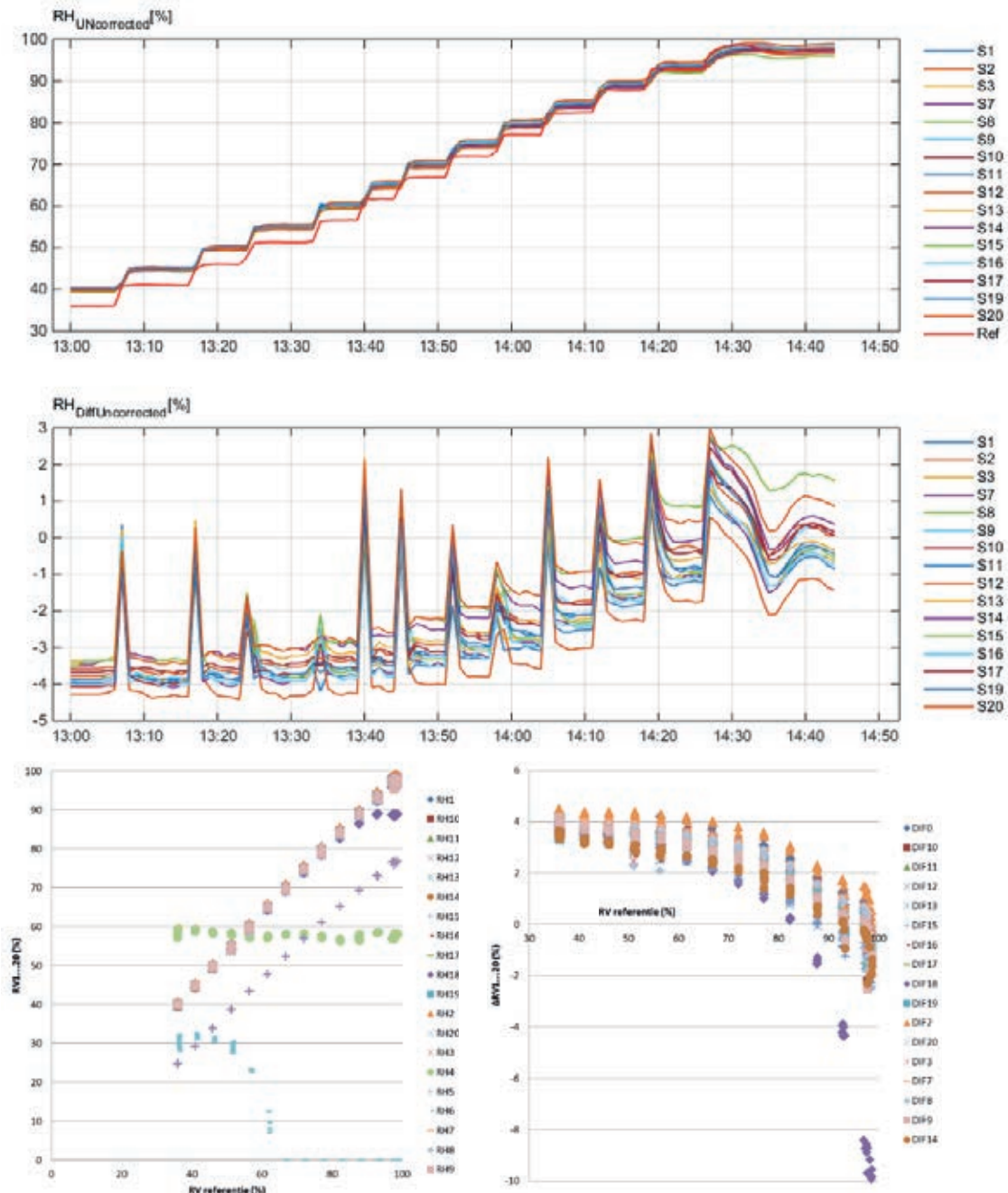
⁴ In volgende grafieken is dezelfde aanpak gebruikt.

In de Tabel 3.2 (rechtsonder), waar de differenties per sensor zijn aangegeven, is te zien dat over het bereik van 40-100% de afwijking voor RV geen lineair gedrag vertoont. Echter, met een algemene lineaire correctie (voor het bereik van RV=40-100%) zijn alle sensoren wel binnen de specificatie te krijgen van $\pm 2\%$. Voor een eerste orde benadering kan dan gebruikt worden (zie Figuur 3.3):

$$RV_{gecorrigeerd} = 1.0745 \times RV - 7.33$$

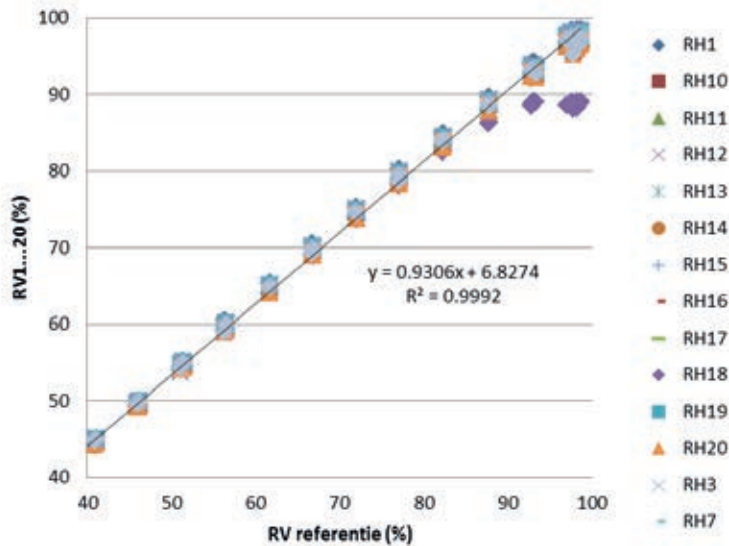
Voor hogere nauwkeurigheden moeten de sensoren individueel gecorrigeerd worden, desgewenst met een 2^{de} orde vergelijking.

Relatieve luchtvochtigheid

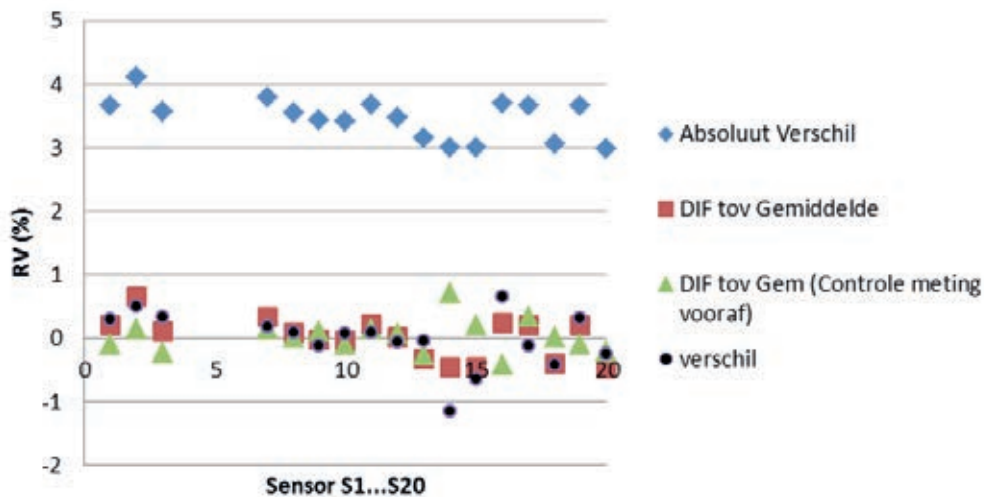


Figuur 3.2 Kalibratie elektronische sensoren voor relatieve luchtvochtigheid bij een $T=20-25^{\circ}\text{C}$. Ruwe tijdsmetingen (geheel boven); Differenties (meetwaarde-referentiewaarde) als functie van de tijd (Midden). Gemiddelde meetwaarden tussen de transities (RH1...20) voor alle 20 sensoren uitgezet tegen de referentiewaarde (linksonder). De afwijkingen van de sensoren (DIF1...20) t.o.v. de referentie sensor (rechtsonder).

De onderlinge afwijkingen van de individuele sensoren (differenties t.o.v. het gemiddelde over alle sensoren) verkregen uit de kalibratieproef kunnen ook vergeleken worden met de resultaten uit de controle meting voorafgaande aan de praktijkproef (Zie §3.1.2, Figuur 3.4 en Tabel 3.4). Te zien is dat het absolute verschil (ten gevolge van het a-lineair gedrag van de sensor) veel groter (een factor 3-4) is dan het onderlinge verschil van de sensoren. Verder zien we dat er best grote verschillen zijn tussen de offsets bepaald vooraf en achteraf.



Figuur 3.3 Kalibratie elektronische sensoren voor relatieve luchtvochtigheid. Meetwaarden (RH1...20) voor alle 20 sensoren uitgezet tegen de referentiewaarde (links). De afwijkingen van de sensoren (DIF1...20) t.o.v. de referentie sensor (rechts).



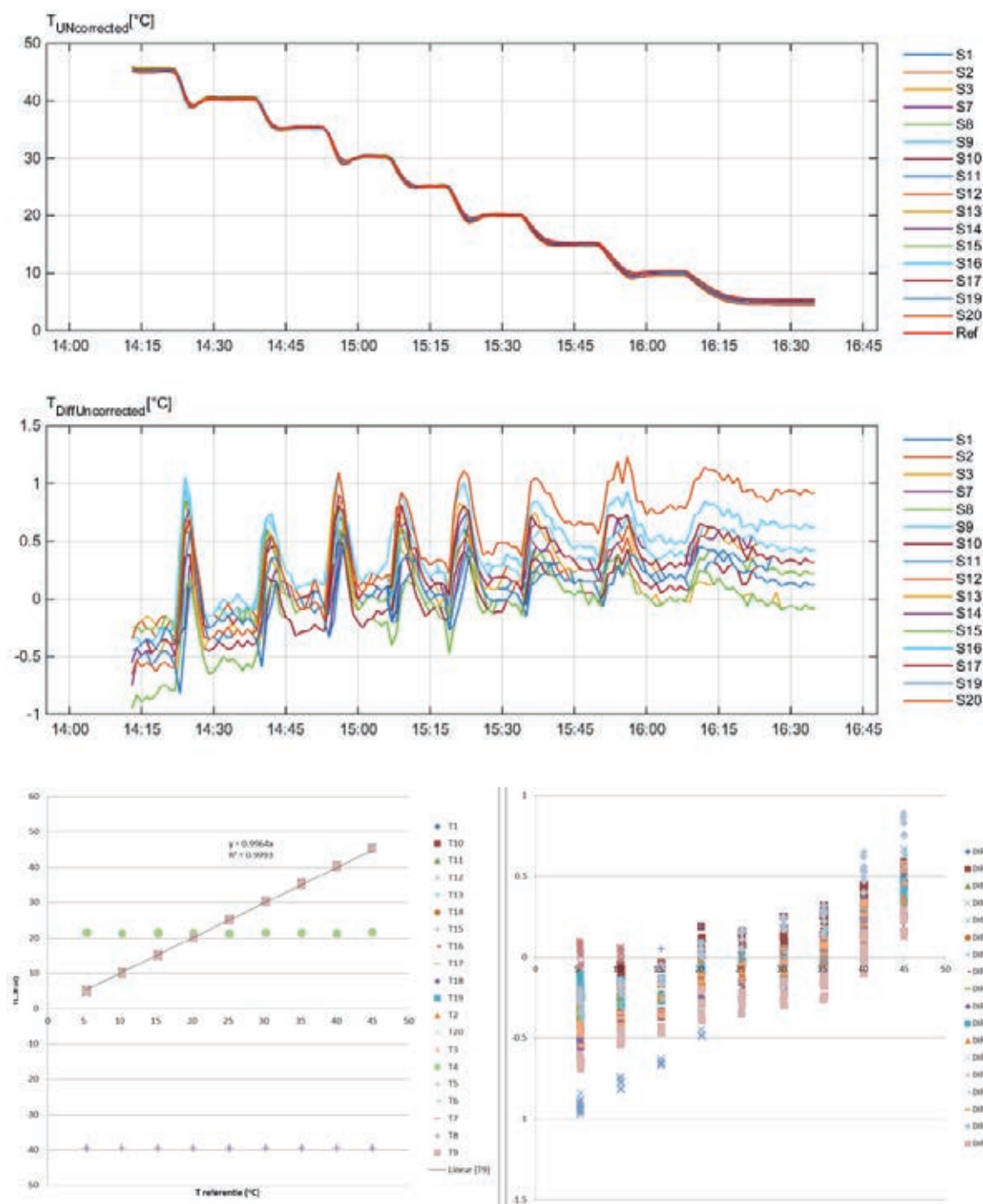
Figuur 3.4 Offset factoren van de elektronische sensoren bepaald bij ca. $T=25^{\circ}\text{C}$ ($24.5 - 25.5^{\circ}\text{C}$) en $RV = 51\%$ ($51-56\%$) in vergelijking met de waarden gevonden bij controle vooraf (zie Tabel 3.4) voor de RV.

De conclusie is dat correctie voor het a-lineaire gedrag zinvol is, en dat een algemene correctie voor alle sensoren gebruikt kan worden voor praktische toepassingen. Het beste kan dit gebeuren door een absolute kalibratie. Correctie van de offset of basis van alleen een controle meting voor iedere sensor apart is niet zinvol. De controle meting is alleen zinvol voor het vinden van defecte sensoren.

Kijkend naar de specificatie van de leverancier Sensirion (zie Bijlage 1) en naar de grafiek in figuur 3.2 rechts, dan lijkt het erop dat de sensoren buiten de specificatie van de SHT75 ($\pm 2\%$) vallen. Ze vallen wel binnen de specificatie van de SHT71 ($\pm 4\%$). Dit is specifiek geverifieerd, en de gebruikte sensoren zijn van het type SHT75 met betere specificatie.

Het lijkt erop dat de fabrikant de sensoren zodanig afregelt of produceert dat het a-lineair zijn van het verband zodanig wordt meegenomen dat deze in het middengebied (RV = 10-90%) een maximale positieve afwijking heeft (ca. +3.5%) en in het randgebied (>90% en <10%) binnen de hogere afwijkingen blijft.

Temperatuur



Figuur 3.5 Kalibratie elektronische sensoren voor temperatuur bij een RV=74-76%. Ruwe meetwaarden en differenties in de tijd (boven). Gemiddelde meetwaarden in stabiele perioden tussen transities (T1...20) voor alle 20 sensoren uitgezet tegen de referentiewaarde (linksonder). De afwijkingen van de sensoren (DIF1...20) t.o.v. de referentie sensor (rechtsonder).

In de grafiek 3.5 (links) is te zien dat de sensoren S4 en S5 geen goede waarden geven. Deze worden daarom in de analyse buiten beschouwing gelaten.

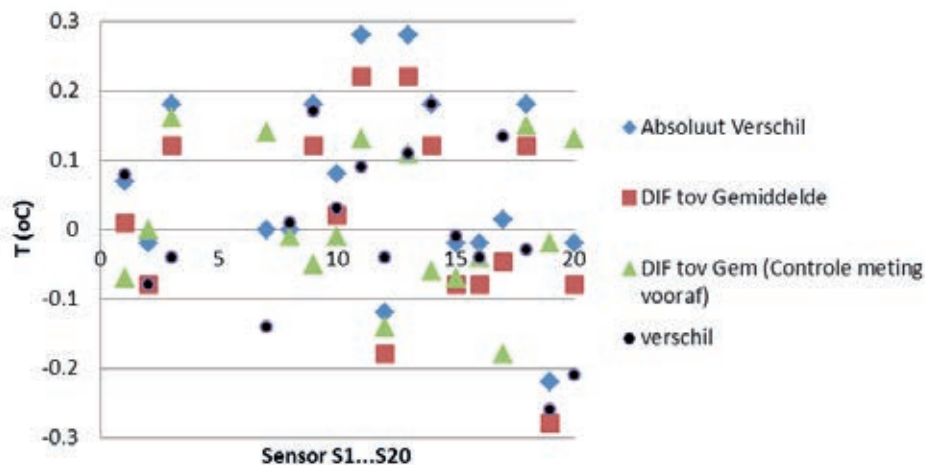
In het algemeen geven de sensoren voor temperatuur over het bereik van 5 – 45°C een goed 1:1 verband te zien met de referentiewaarden (Fig 3.5 boven). Een fit door de oorsprong geeft een R^2 van bijna 1 ($R^2 = 0.9993$).

Kijkend in detail naar de afwijkingen over het gehele meetgebied dan zien we dat die net buiten de marges liggen van de specificatie ($\pm 0.3^\circ\text{C}$ bij 25°C en $\pm 0.5^\circ\text{C}$ aan de randen van het bereik, zie bijlage 1). Wanneer we echter ook rekening houden met de onnauwkeurigheden van de kalibrator, lijken de meeste sensoren wel net te voldoen aan de fabrieksspecificatie.

Verder zien we dat de absolute fouten niet random over het bereik verdeeld zijn maar een duidelijk positief verband met de temperatuur hebben. Ook zijn de onderlinge verschillen tussen de sensoren zijn kleiner dan de absolute afwijkingen (zie grafiek 3.5 rechtsonder). Daarom lijkt het zinvol om de sensorenwaarden voor temperatuur met een algemene lineaire functie te corrigeren. Met een lichte lineaire correctie kan de temperatuur voor alle sensoren (behalve S4, S5) binnen de specificatie getrokken worden, door bij 5°C de temperatuur met 0.4°C te verhogen en bij 45°C met 0.5°C te verlagen. Deze correctiewaarden zijn veel groter dan de meetnauwkeurigheid ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) van de kalibrator, dus zinvol. De correctie formule wordt dan:

$$T_{\text{gecorrigeerd}} = 0.5125 + 0.9775 \times T$$

De afwijkingen van de individuele sensoren (differenties voor temperatuur t.o.v. het gemiddelde over alle sensoren) kunnen achteraf nog vergeleken worden met de controle meting vooraf (zie Figuur 3.6 en Tabel 3.4). Het absolute verschil voor alle sensoren ligt in ieder geval binnen de specificatie van de sensoren ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Te zien is ook dat het absolute verschil (ten gevolge van het a-lineair gedrag van de sensor in dezelfde grootte orde ligt als het verschil tussen de individuele offsets bepaald voor en na de metingen in de kas. Het lijkt er dus op dat de drift over langere termijn van de sensoren voor de temperatuur ($< \pm 0.25^\circ\text{C}$) een zelfde orde van grootte heeft als de absolute verschillen (bij kalibratie achteraf). Correcties voor individuele sensoren voor temperatuur lijkt daarom niet zinvol.



Figuur 3.6 Offset factoren van de elektronische sensoren bepaald bij ca. $T=25^\circ\text{C}$ ($24.5 - 25.5^\circ\text{C}$) en $RV = 51\%$ ($51-56\%$) in vergelijking met de waarden gevonden bij controle vooraf (zie Tabel 3.4) voor temperatuur.

Ook voor temperatuur is de conclusie dat algemene correctie voor het a-lineaire gedrag wel zinvol is. Zeker voor praktische toepassing. Het beste kan dit gebeuren met een absolute kalibratie meting. Correctie van de offset of basis van alleen een controle meting voor iedere sensor apart is niet zinvol. De controle meting is alleen zinvol voor het vinden van defecte sensoren. Ten behoeve van het onderhavige onderzoek is wel gebruik gemaakt van een individuele correctie voor temperatuur en RV van de elektronische sensoren.

Conclusie kalibratie elektronische sensoren

Vergelijken we deze resultaten met de eerste controle meting van alle sensoren in de doos, dan zien we dat bij de eindkalibratie de S14 niet direct buiten de boot valt, terwijl deze bij de controle meting als verdacht was aangemerkt. Daarnaast vallen bij de kalibratie 3 sensoren voor RV (S4, S5, S6) buiten de boot, welke niet als verdacht in de controle meting waren gevonden. Blijkbaar vertonen de elektronische sensoren toch een bepaalde drift, wellicht ten gevolge van de invloed van de metingen in de kas. Het is niet direct duidelijk welke invloeden dit zijn, maar het zeker belangrijk om bij onderzoek telkens vooraf en achteraf een controle meting en liever nog een kalibratie uit te voeren.

Daarom is het belangrijk bij gebruik van elektronische sensoren in de praktijk de sensorwaarden te kalibreren alvorens deze in een regeling te gebruiken. Om defecte sensoren eruit te kunnen halen zijn controle metingen mogelijk, maar dan zijn tenminste twee RV's en T's wenselijk.

Voor toepassing als controle middel voor de FBG sensoren is een individuele kalibratie van de elektronische sensoren voor zowel temperatuur als RV noodzakelijk (zie §3.1.4).

3.1.4 Individuele correctie elektronische sensoren

Gezien de ervaringen van de analyses in §3.1.3 is besloten om voor de elektronische sensoren voor de temperatuur een lineaire correctie en voor de RV een tweede orde correctie toe te passen, als volgt:

$$T_{gecorrigeerd} = a + b \times T \quad \text{en:} \quad RV_{gecorrigeerd} = c + d \times RV + e \times RV^2$$

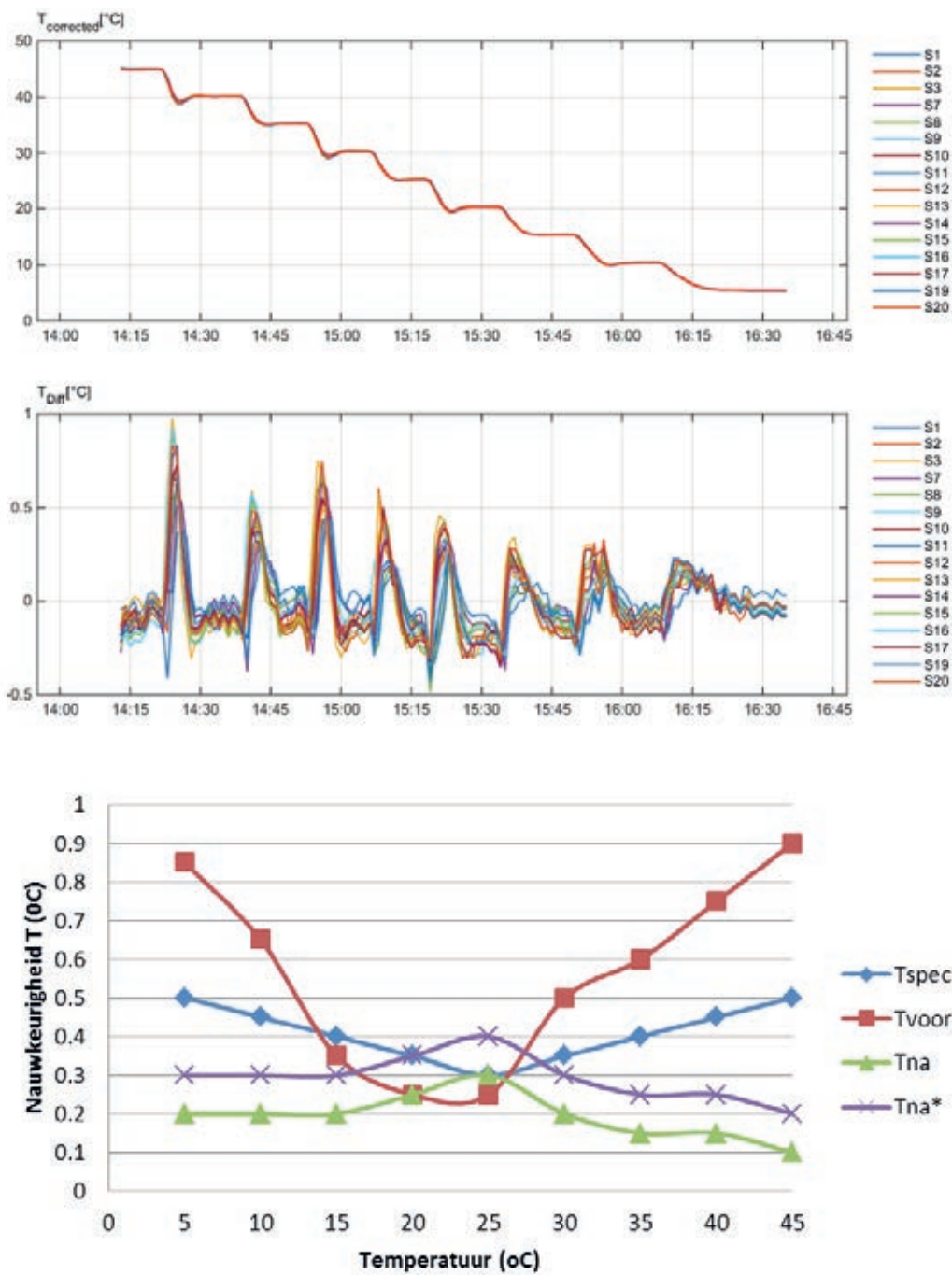
De factoren die daarvoor bepaald zijn, staan in de volgende Tabel 3.5.

Tabel 3.5

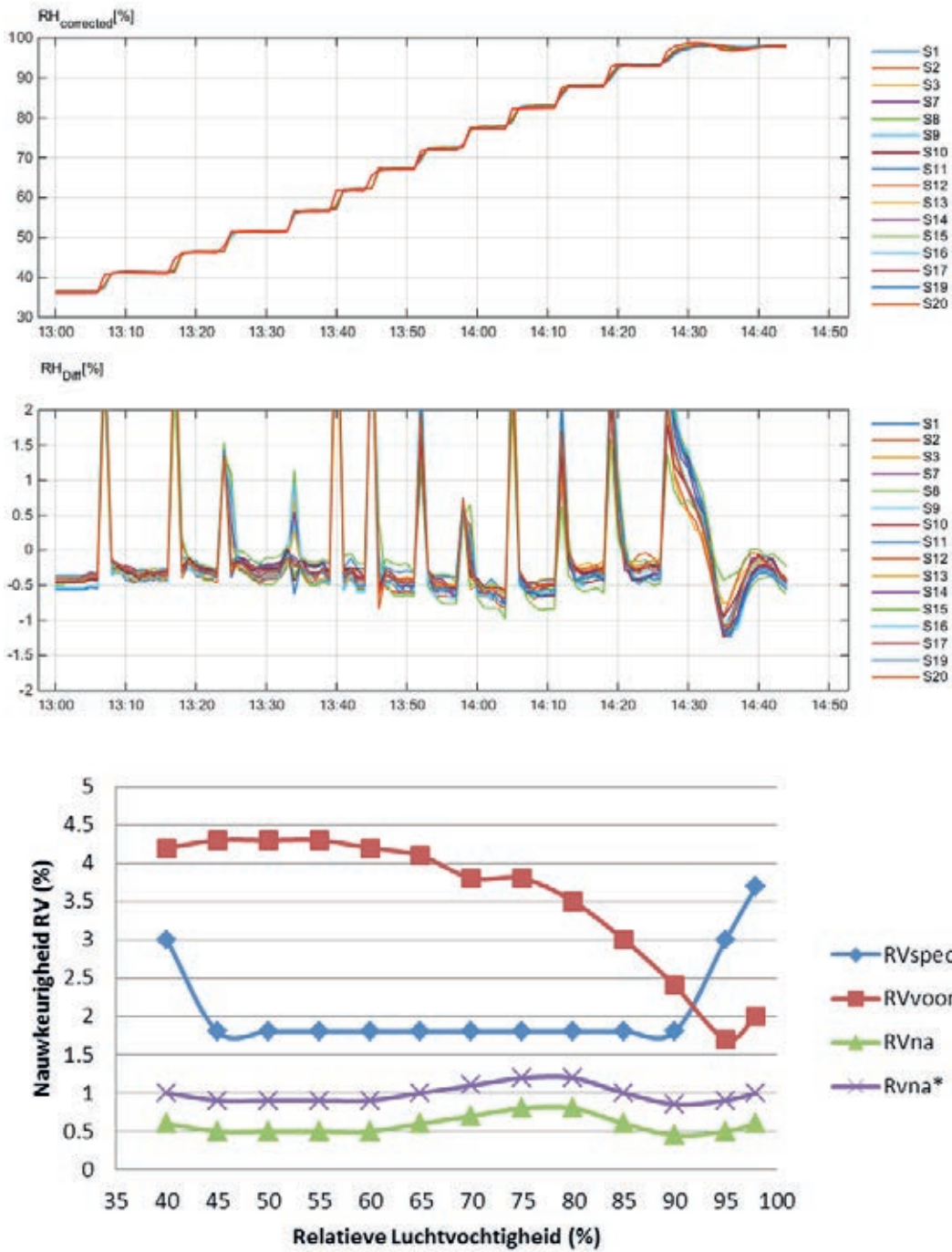
Correctiefactoren voor temperatuur (a,b) en RV (c,d,e) voor de elektronische sensoren. Voor S4, 5, 6 en S18 zijn geen kalibratiefactoren bepaald.

S	a	b	c	d	e	S	a	b	c	d	e
S1	0.4298	0.9887	1.6072	0.8109	0.001714	S11	0.4541	0.9824	-0.4086	0.8650	0.001439
S2	0.4146	0.9892	-0.7370	0.8725	0.001267	S12	0.6110	0.9865	-0.6520	0.8778	0.001370
S3	0.1211	0.9967	-0.2157	0.8655	0.001367	S13	0.6069	0.9833	-0.7946	0.9023	0.001090
S4	-	-	-	-	-	S14	0.6767	0.9821	-1.0936	0.9047	0.001185
S5	-	-	-	-	-	S15	0.1264	0.9976	1.0366	0.8224	0.001932
S6	-	-	-	-	-	S16	0.6336	0.9859	-0.5961	0.8740	0.001317
S7	0.6671	0.9782	-1.0949	0.8881	0.001222	S17	0.6225	0.9838	-0.9557	0.8767	0.001415
S8	0.4733	0.9779	-0.8554	0.8851	0.001270	S18	-	-	-	-	-
S9	0.8297	0.9827	-1.2465	0.8933	0.001289	S19	0.3415	0.9895	-1.3141	0.8945	0.001225
S10	0.3322	0.9855	-0.1290	0.8613	0.001501	S20	1.2302	0.9666	-1.9276	0.9237	0.001133

De correcties voor T en RV zijn toegepast op de ruwe data opgenomen tijdens de kalibratie sessie. Het resultaat staat in grafiek 3.7 (T) en grafiek 3.8 (RV) voor ruwe meetwaarden, differenties en ook voor de gemiddelden tussen de transities.



Figuur 3.7 Gecorrigeerde ruwe kalibratie data voor temperatuur (boven) en verschillen met de ingestelde referentie temperaturen (midden). Vergelijking van kalibratie (absolute verschil) met de fabrieksspecificatie (T_{spec}) voor (T_{voor}) en na de individuele correctie (T_{na}) rekening houdend met kalibratie onnauwkeurigheid van de Rotronic sensor T_{na}^* (onder).



Figuur 3.8 Gecorrigeerde ruwe kalibratie data voor relatieve luchtvochtigheid (boven) en verschillen met de ingestelde referentie RV (midden). Vergelijking van kalibratie (absolute verschil) voor (RVvoor) en na de correctie (RVna) met de fabrieksspecificatie RVspec en na correctie voor de kalibratie specificatie (RVna*) (onder).

Tijdens de transitie naar de volgende T (en ook RV) waarde is een verschil in responsie te zien tussen de referentiesensor (Rotronic) en de elektronische sensoren, dat zich uit in de vorm van pieken in grafieken van T_{Diff} en RV_{Diff} . Gedurende deze momenten kunnen de elektronische sensoren niet vergeleken worden met de Rotronic sensor. Daarom zijn voor de kalibratie alleen de gemiddelde waarden tussen de transities gebruikt, zoals aangegeven in de Figuur 3.7 (onder), en ook in volgende grafiek voor RV, Figuur 3.8 (onder).

Na correctie/kalibratie liggen alle T waarden binnen een band van +0.1 tot -0.3 °C ten opzichte van $T_{Referentie}$. Kijkend naar de absolute afwijkingen en rekening houdend met een nauwkeurigheid van de Rotronic kalibrator⁵ van $\pm 0.1^\circ\text{C}$, moet voor verdere vergelijking van de FBG sensoren een nauwkeurigheid van $\pm 0.4^\circ\text{C}$ aangehouden worden over het gehele bereik.

Na individuele correctie liggen alle RV waarden binnen een marge van 0 tot -0.8% t.o.v. $RV_{Referentie}$ (zie RVna). De gecorrigeerde RV waarden blijven daarmee ruim binnen de fabrieksspecificatie, zodat de correctie wel degelijk zin heeft. Bij toenemende RH neemt de spreiding tussen de ES sensoren wel duidelijk toe. Dit geldt ook nog na correctie voor de nauwkeurigheid van de Rotronic (maximaal $\pm 0.5\%$, RVna*). We mogen stellen dat voor het evalueren van de FBG metingen voor RV een nauwkeurigheid aangehouden kan worden van $\pm 1.3\%$.

3.2 Metingen in de kas

De meetdata van de FBG, elektronische en de standaard sensoren zijn beschikbaar in twee perioden. De eerste periode (Meting 1) is van 26 juli tot 6 september. Op 6-september is de montage van de FBG sensoren aangepast zodat deze spanningsvrij in de meetkamer zitten. De tweede periode (Meting 2) is van 8 september tot en met 27 oktober. Deze data zijn verwerkt in Matlab, met het programma AnalyseFBGdata. De eerste analyse (zonder correctie voor looptijd) is Meting2a genoemd. Na de looptijd-correctie is een subset van de data van de tweede periode gebruikt (9 – 26 september) door TNO om de glasvezelsensoren te vergelijken met de gekalibreerde elektronische sensoren (Meting2b).

De elektronische sensoren vertonen kleine afwijkingen, maar deze zijn gecorrigeerd volgens de aanpak beschreven in §3.1.4 (individuele sensor correctie).

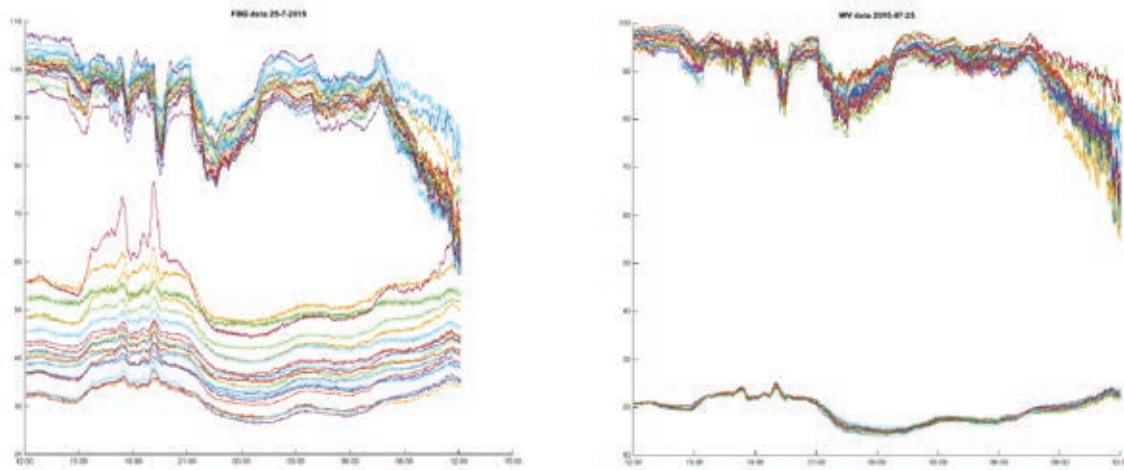
De sensoren Ref1 en Ref2 zijn wel gekalibreerde sensoren maar zaten ruimtelijk op een andere plaats in de kas. De kas vertoont horizontaal weinig spreiding zodat Ref1 en Ref2 alleen voor indicatie zijn meegenomen.

3.2.1 Meting 1: Globale vergelijking (26 jul. t/m 6 sept.)

Uit de eerste ruwe meetresultaten (Figuur 3.9 en Figuur 3.10) wordt duidelijk dat de meetdata van de FBG-sensoren, systematische fouten vertonen, maar dat de trends wel lijken te kloppen. De ruwe meetwaarden van de FBG sensoren van de temperatuur laten zien dat de sensoren in groepen een zelfde orde verschuiving (offset) in temperatuur hebben. De meetwaarden van de RV zijn duidelijk te hoog, tot 110%. De data van de elektronische sensoren vertoont een lage spreiding. De meetwaarde van de RV zijn ongeveer 5% te hoog.

Op basis van de vorm van de FBG data is besloten een "proef" correctie uit te voeren met een lineaire correctie ($y=ax+b$) met de elektronische sensor data als referentie. De afwijkingen werden daardoor kleiner (Figuur 3.11). Te zien is dat de lineaire correctie goed werkt (Figuur 3.12), maar dat er daarnaast nog een effect is dat er soms nog wel een groot verschil tot wel $\pm 4^\circ\text{C}$ en tot $\pm 15\%$ kan ontstaan tussen de elektronische en FBG sensoren (Figuur 3.14). Geconcludeerd is dat er mogelijk dus minstens twee effecten zijn die de FBG metingen beïnvloeden.

⁵ De nauwkeurigheid van de kalibrator is 0.3, 0.4 en 0.5%, allen bij 24°C met een onzekerheid van 0.1°C (Rotronic HC2S, gekalibreerd op 29-10-2015 bij: RV=34, 50, en 80%).

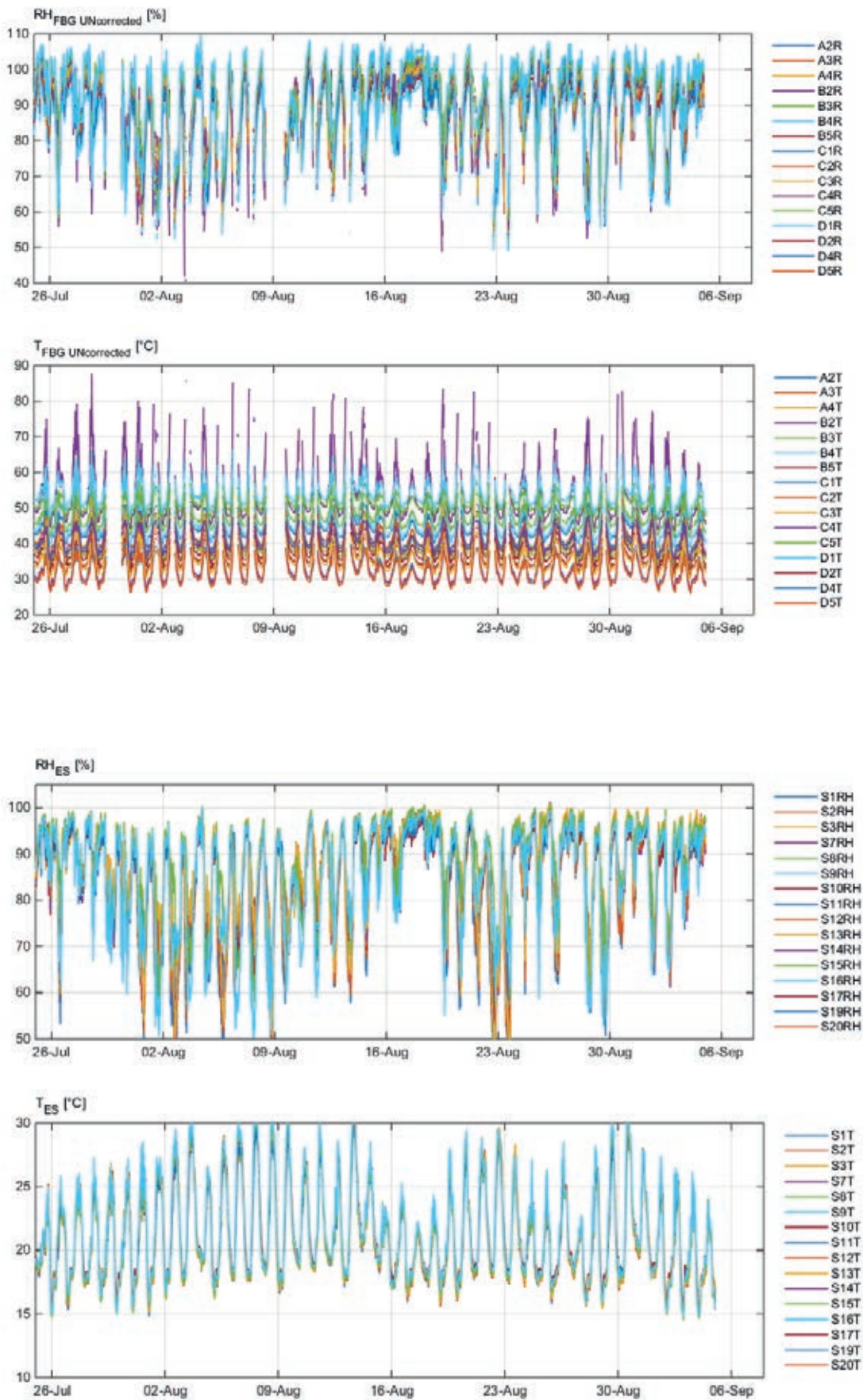


Figuur 3.9 Temperatuur en RV meetdata FBG sensoren (links) vergeleken met elektronische meetdata (rechts) in de eerste periode (beiden ongecorrigeerd), weergegeven voor een dag (25-7-2015).

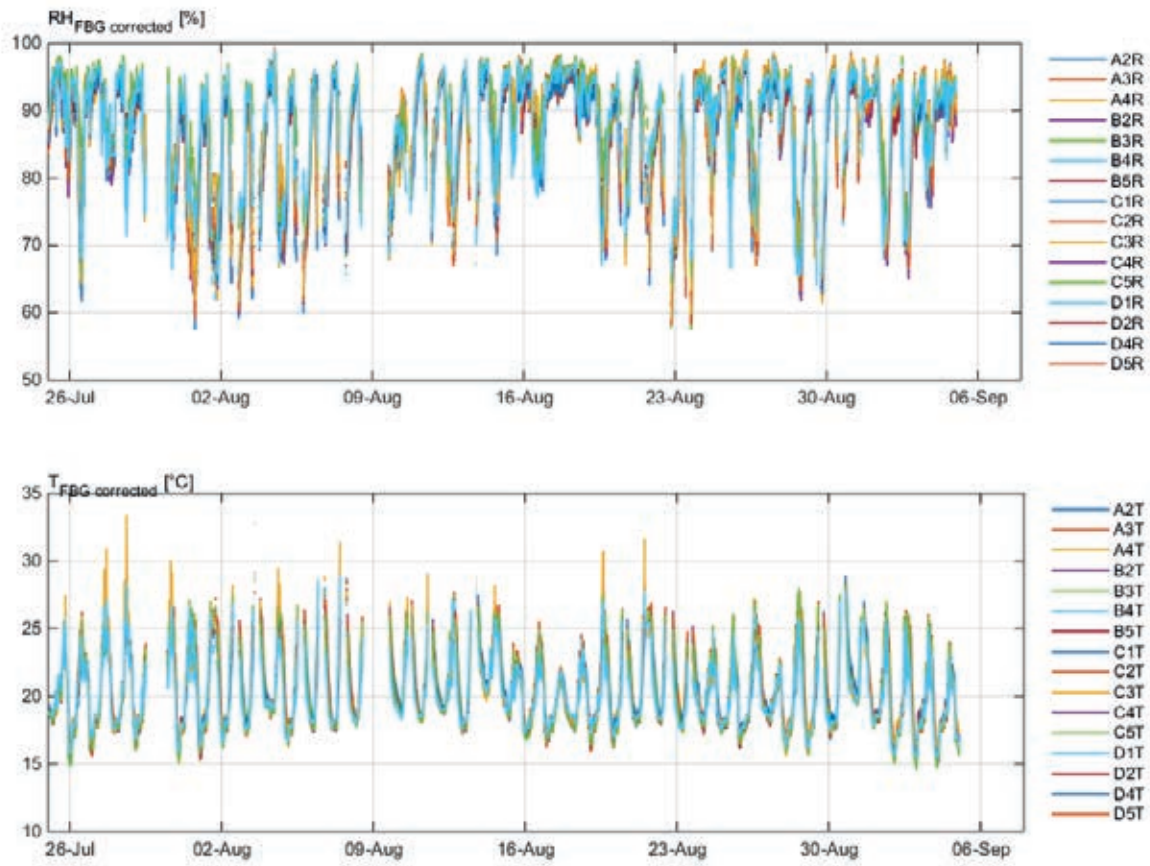
Door TNO is een nadere analyse van de gemeten afwijkingen uitgevoerd.

De eerste fout die gevonden is bestond uit het feit dat de glasvezel meetelementen (Figuur 2.5, punt 6) aan twee zijden ingeklemd waren. Daardoor kwam er rek op de glasvezel te staan waardoor de meting verstoord kon worden. Deze fout is gecorrigeerd door alle sensoren alleen maar enkelzijdig in te klemmen.

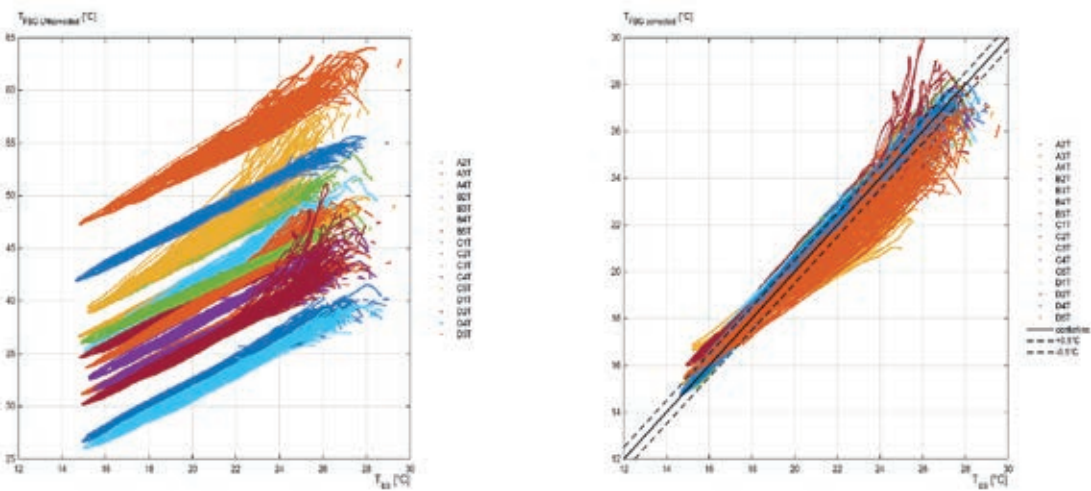
De tweede fout vond zijn oorsprong in looptijd verschillen ten gevolge van het verschil in gebruikte glasvezel lengtes tussen de kalibratie en de metingen in de kas. Voor deze afwijkingen is door TNO gecorrigeerd door naar het gemiddelde verschil in gemeten temperatuur te kijken van de elektronische sensoren en de FBG sensoren. Dit verschil is niet exact berekend, maar geschat. Vanuit de verschiltemperatuur is een afstand-offset in de golflengte berekend. Deze golflengte is daarna opgezet in een afstand tot de sensor. De golflengte offset is daarna toegepast op zowel de T als de RV sensoren en is gelijk voor de gehele tijdsperiode. Deze nieuwe golflengtes zijn daarna door de kalibratie formules gehaald die waren bepaald tijdens de initiële kalibratie in het lab. Dit betekent dat er alleen een offset waarde is voor de afstand, welke gelijk is over de gehele periode, en geen gevoeligheidsverandering geeft.



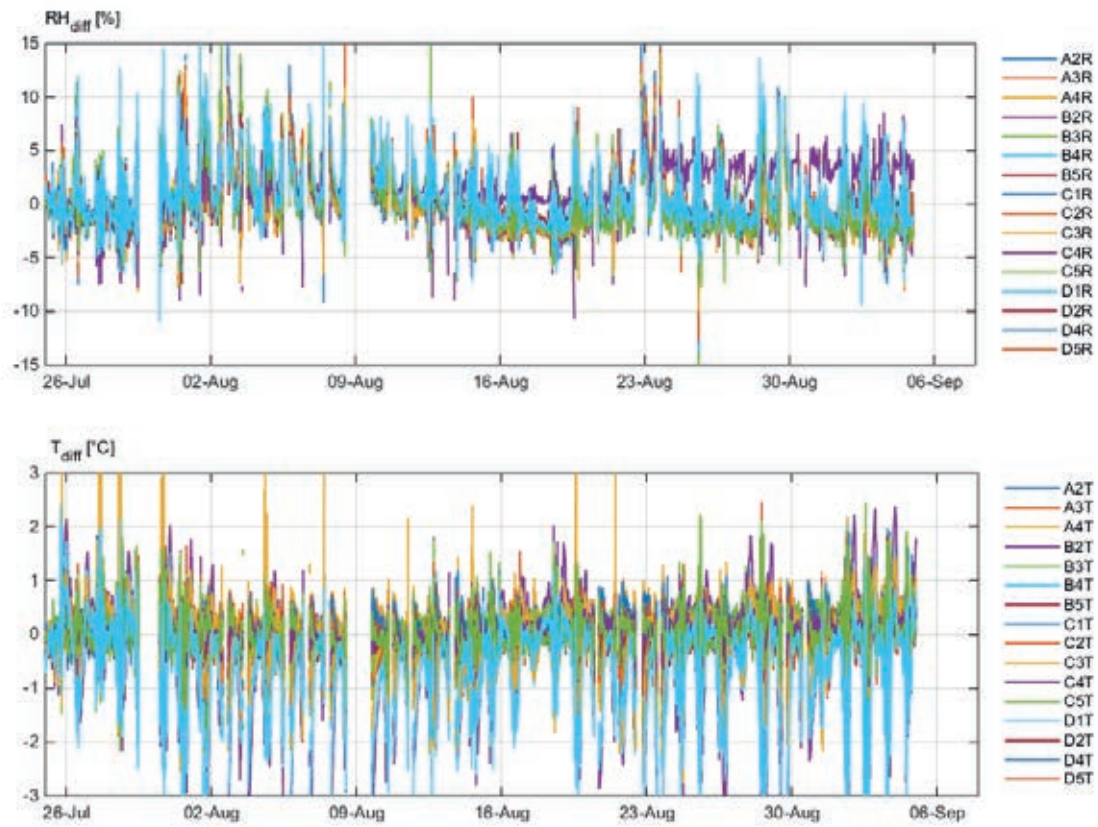
Figuur 3.10 Ongecorrigeerde (boven) meetdata van FBG sensoren vergeleken met de elektronische (ES) sensoren (onder) voor de gehele eerste periode.



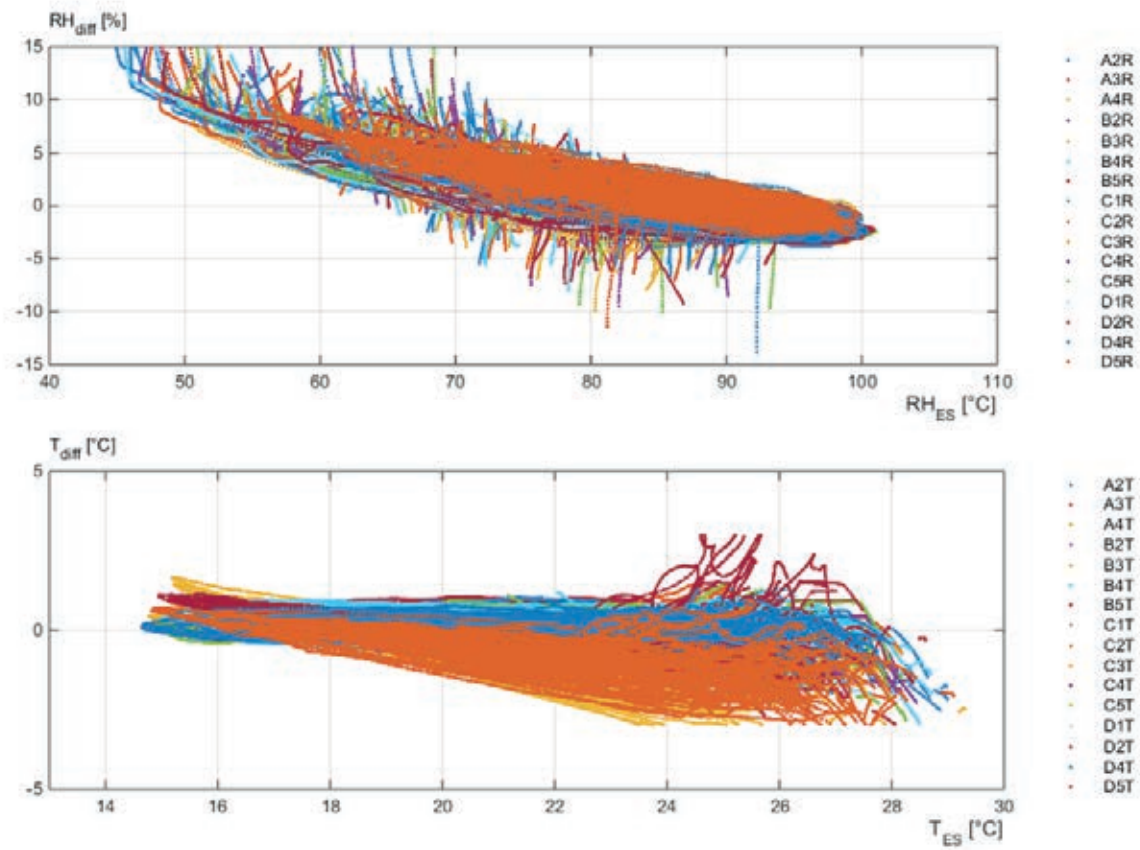
Figuur 3.11 Gecorrigeerde meetdata FBG sensoren in de eerste periode.



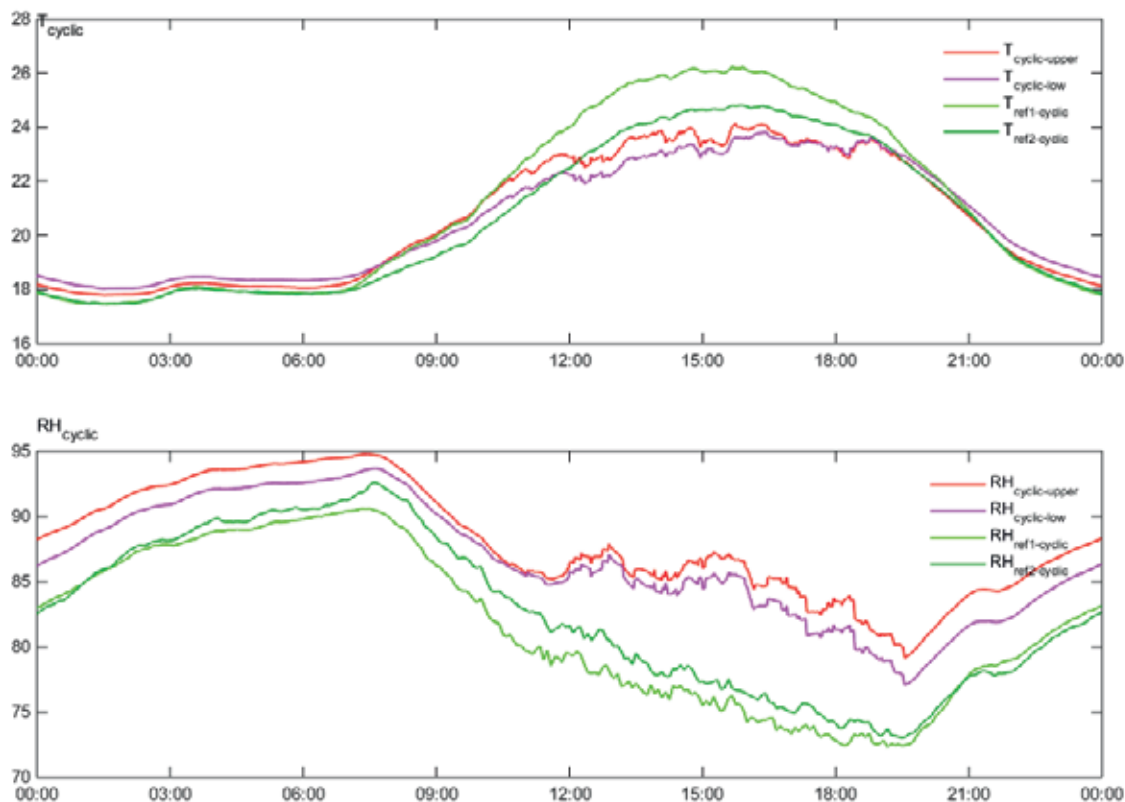
Figuur 3.12 Vergelijking van ongecorrigeerde en gecorrigeerde meetdata FBG sensoren t.o.v. de elektronische sensor data voor temperatuur in de eerste periode.



Figuur 3.13 Verschilwaarden tussen FBG data en elektronische data voor temperatuur en RV na lineaire correctie over de gehele eerste meetperiode.



Figuur 3.14 Residu-plots voor verschilwaarden (T_{diff} en RH_{diff}) tussen FBG data en elektronische data voor temperatuur en RV na lineaire correctie over de gehele eerste meetperiode.



Figuur 3.15 Cyclisch gemiddelde over 24 uur van gecorrigeerde FBG-sensoren en 2 gekalibreerde meetboxen van 26 juli – 26 sept.

Om het gedrag van de lineair gecorrigeerde FBG sensoren over een langere periode te interpreteren is het cyclisch gemiddelde over het gemiddelde van alle FBG-sensoren boven in de kas en onder in de kas genomen en dit vergeleken met de referentie meetboxen (ref1 en ref2) boven en onderin. Dit is weergegeven in figuur 3.15, opgesplitst in de hoger en lager gelegen sensoren (upper, low).

Uit Figuur 3.15 blijkt dat de temperatuur van de FBG sensoren overdag een paar graden minder aangeven. 's Nachts liggen de temperaturen in hetzelfde gebied. Het verschil overdag zou een indicatie kunnen zijn dat de referentie meetboxen (ook gebruikt voor de klimaatregeling) meer last hebben van instraling dan de experimentele behuizingen voor de FBG en elektronische sensoren. Uit soortgelijk onderzoek (Gezonde Kas, Balendonck, 2015) zijn dergelijke waarnemingen ook gedaan.

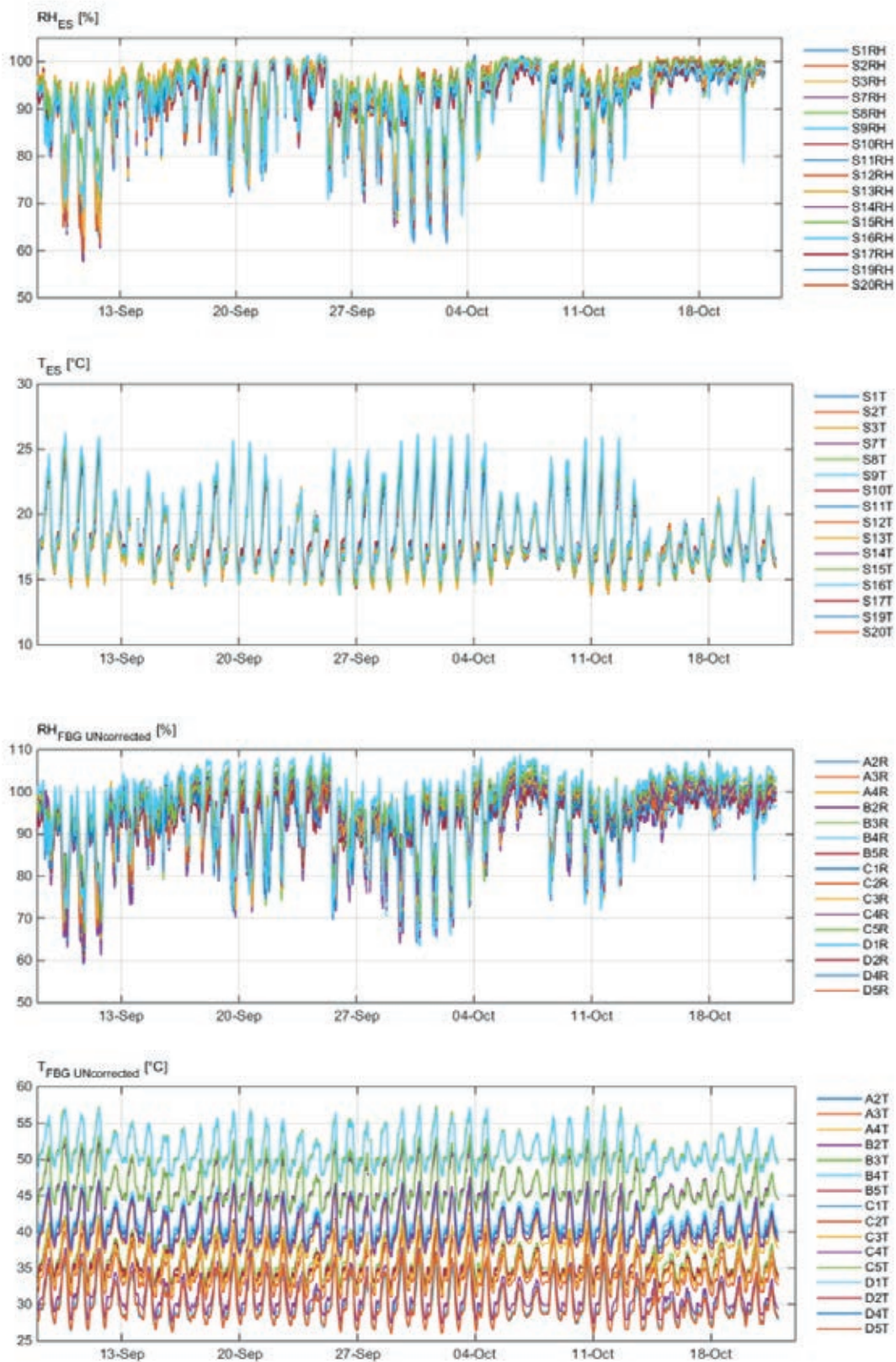
Voor de RV zien we systematisch dat de FBG een iets hogere RV aangeven (ca. +10% 's nachts). Overdag is te zien dat (zoals verwacht) er een effect van een lage temperatuur resulteert in een verhoogde RV. Systematische verschillen in RV (overdag en 's nachts) kunnen mogelijk veroorzaakt zijn door hoogteverschillen tussen de sensoren.

Omdat de referentie meetboxen niet op dezelfde hoogte hangen, kan hiermee niet een sluitend oordeel over de werking van de FBG sensoren gegeven worden. De verschilleffecten die we hier zien, hoeven niet persé toegerekend te worden aan de FBG sensoren.

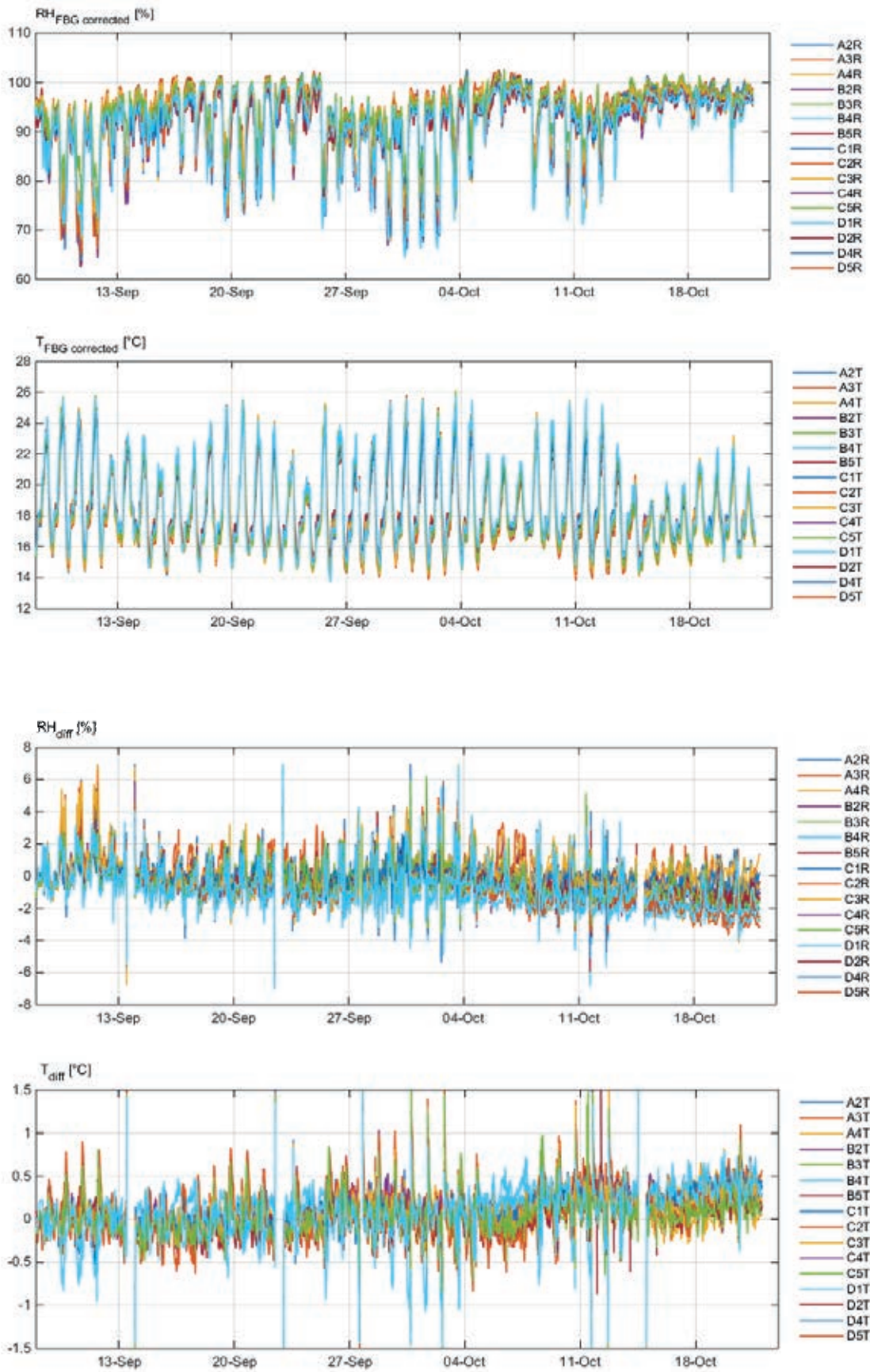
3.2.2 Meting 2a: Glasvezel eenzijdig ingeklemd (8 sept. – 27 okt.)

Hier worden de meetdata gegeven voor de tweede periode waarbij de glasvezel enkelzijdig was ingeklemd (correctie van 1^{ste} fout).

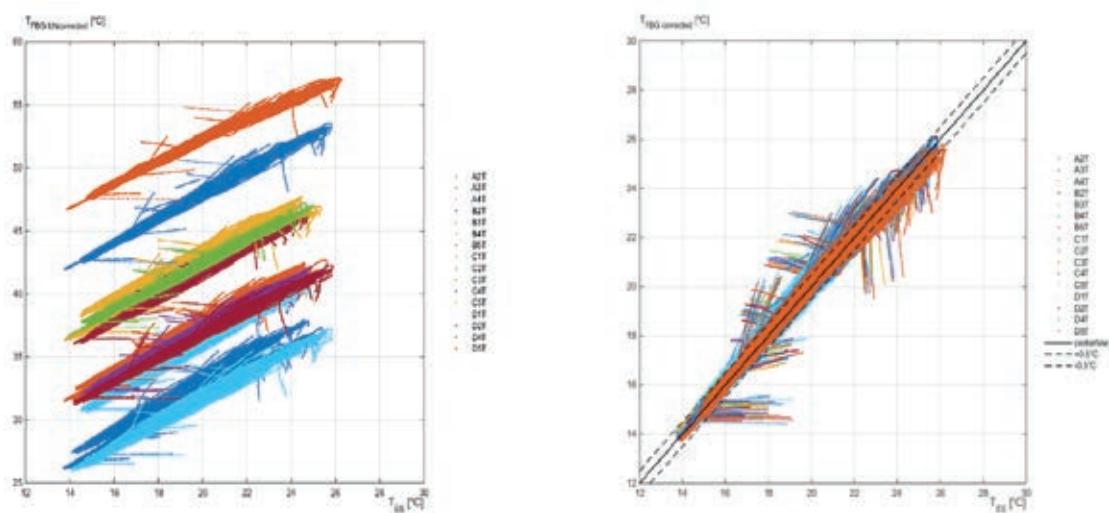
Figuur 3.16 geeft de ongecorrigeerde FBG data vergeleken met de gekalibreerde elektronische sensoren voor deze periode. Alhoewel de verschillen tussen de sensoren kleiner zijn dan in de eerste periode, blijft er duidelijk een verschil te zien. Ook voor deze meetdata is daarom een lineaire correctie toegepast om te zien of daarmee een betere kalibratie verkregen kon worden. De resultaten daarvan staan in Figuur 3.17 tot en met 3.20.



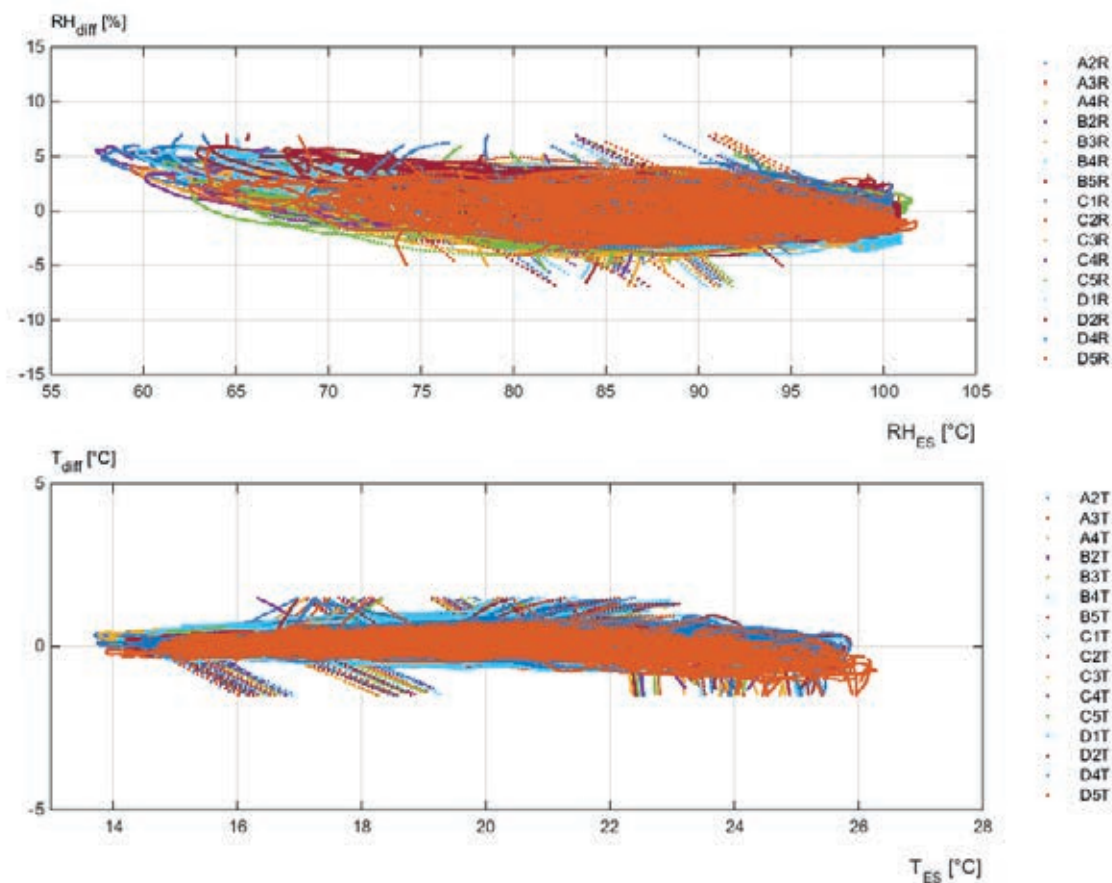
Figuur 3.16 Meetdata van de FBG sensoren (genoemd "uncorrected") die enkelzijdig waren ingeklemd en vergeleken met de elektronische (ES) in de gehele tweede periode.



Figuur 3.18 Verschil tussen elektronische sensordata en FBG meetdata voor de gehele tweede periode.



Figuur 3.19 Gecorrigeerde FBG meetdata voor de gehele tweede periode uitgezet tegen de elektronische sensordata voor temperatuur (links) en RV (rechts).

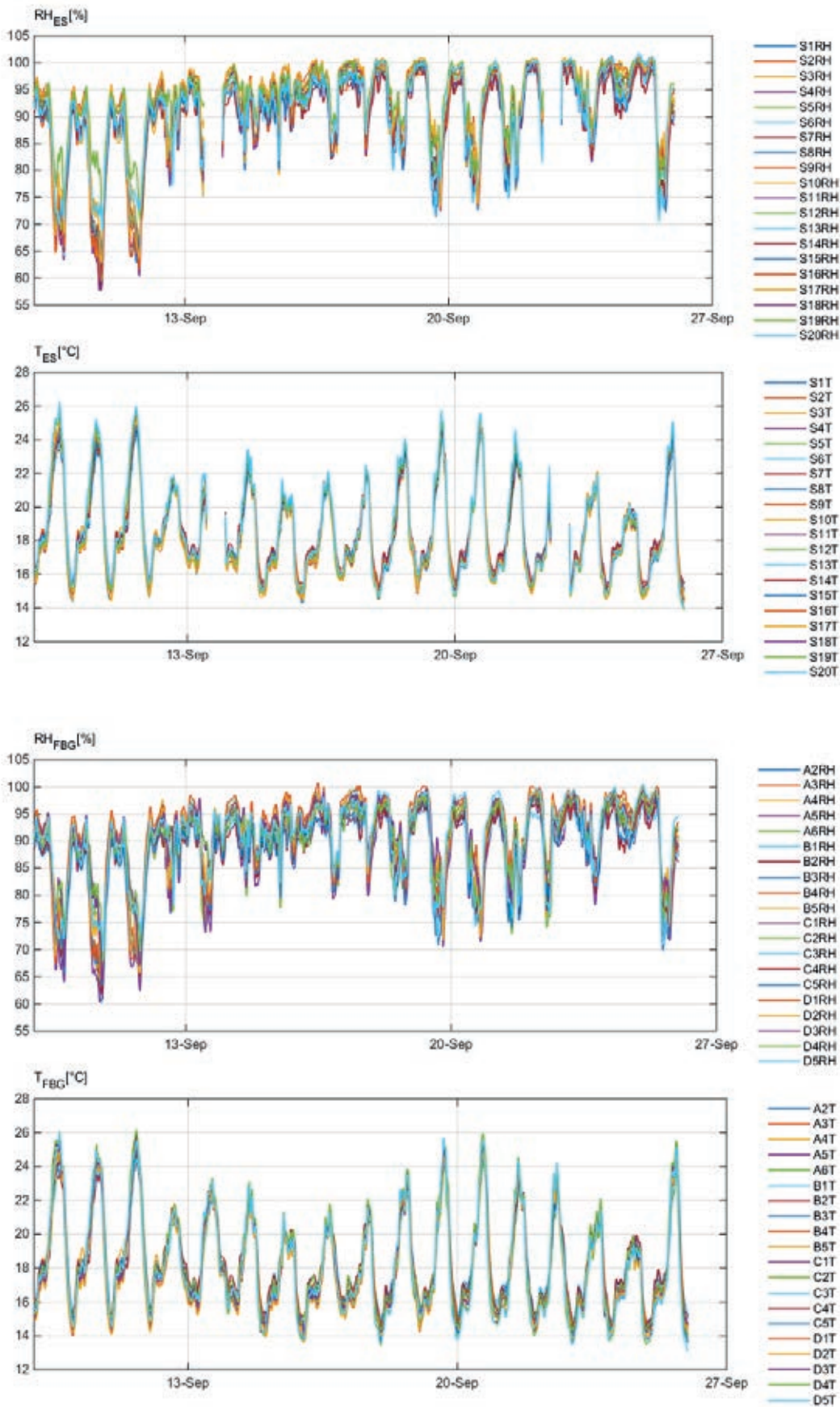


Figuur 3.20 Differenties in T (onder) en RV (boven) tussen de lineair gecorrigeerde FBG meetdata en de elektronische sensordata voor de gehele tweede periode uitgezet tegen de elektronische sensordata voor temperatuur en RV.

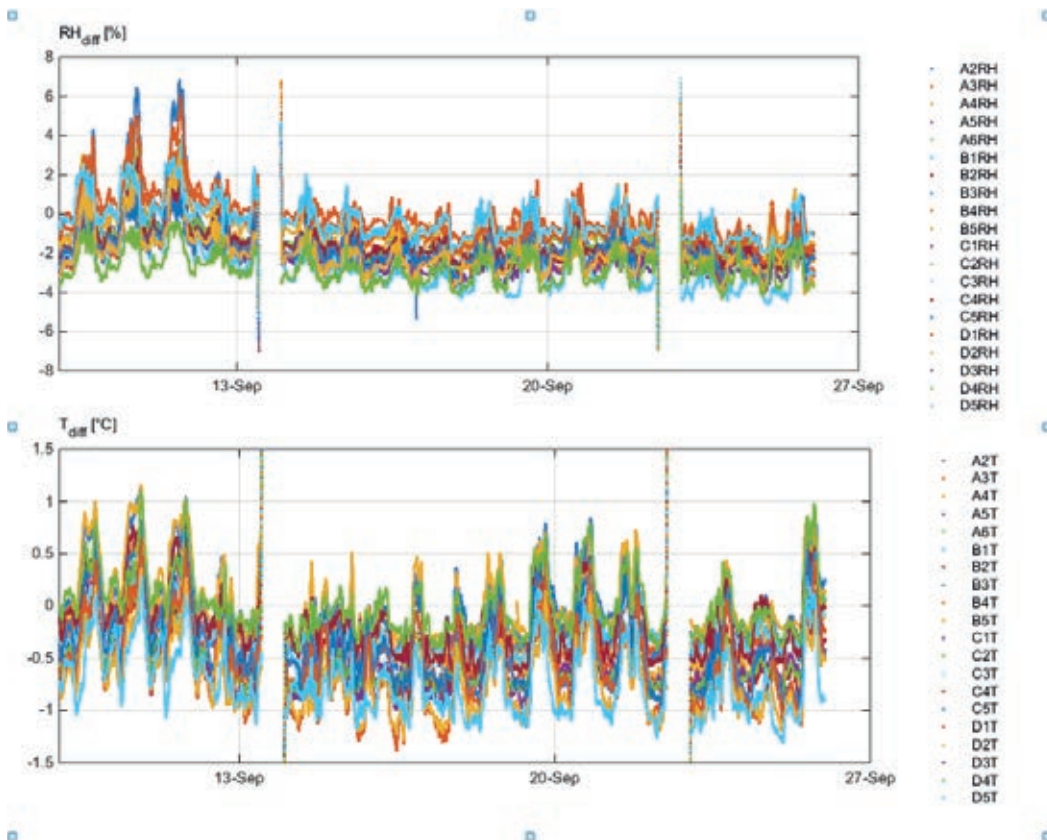
Uit figuur 3.20 blijkt dat voor temperatuur de differenties binnen een bereik van $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ liggen. Voor de RV ligt dit binnen een band van ca. $\pm 5\%$. Wel moet worden opgemerkt dat de hogere afwijkingen vooral bij een beperkt aantal sensoren ontstaat (bv. de blauwe lijnen in T-grafiek). Na de lineaire correctie lijken de differenties voor temperatuur en RV bij hogere temperatuur toe te nemen. Hiervoor is verder geen (tweede orde) correctie voor temperatuur toegepast. Verder valt in de residuplots op dat er incidentele uitbijters zijn (hoge differenties). Het vermoeden bestaat dat er dynamische verschillen en bemonsteringstijd verschillen zijn tussen de FBG en elektronische data.

3.2.3 Meting 2b: FBG data na correctie voor looptijd (9 t/m 26 sept.)

Omdat de lineaire correctie een goed resultaat gaf, is op een subset van de data uit de tweede periode (9 t/m 26 september) daadwerkelijk op de FBG meetdata de correctie voor de fiberlengte (2^{de} fout) doorgevoerd door TNO. Deze meetdata zijn vervolgens ook vergeleken met de elektronische meetdata. De resultaten daarvan worden weergegeven in figuur 3.21 t/m 3.24.

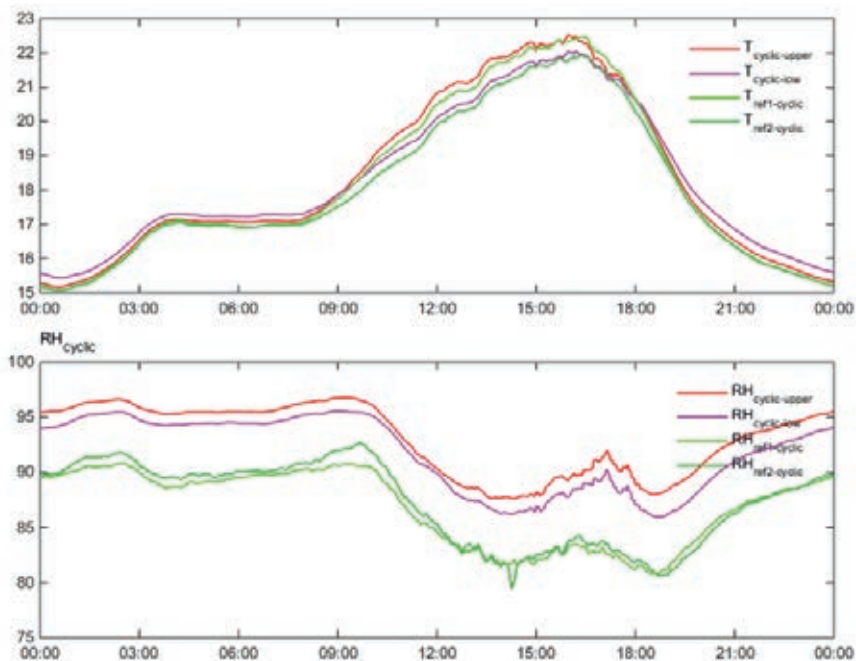


Figuur 3.21 Meetdata voor elektronische en FBG sensoren, na correctie voor looptijd.



Figuur 3.22 Verschillen tussen meetdata voor elektronische en FBG sensoren, na correctie voor looptijd.

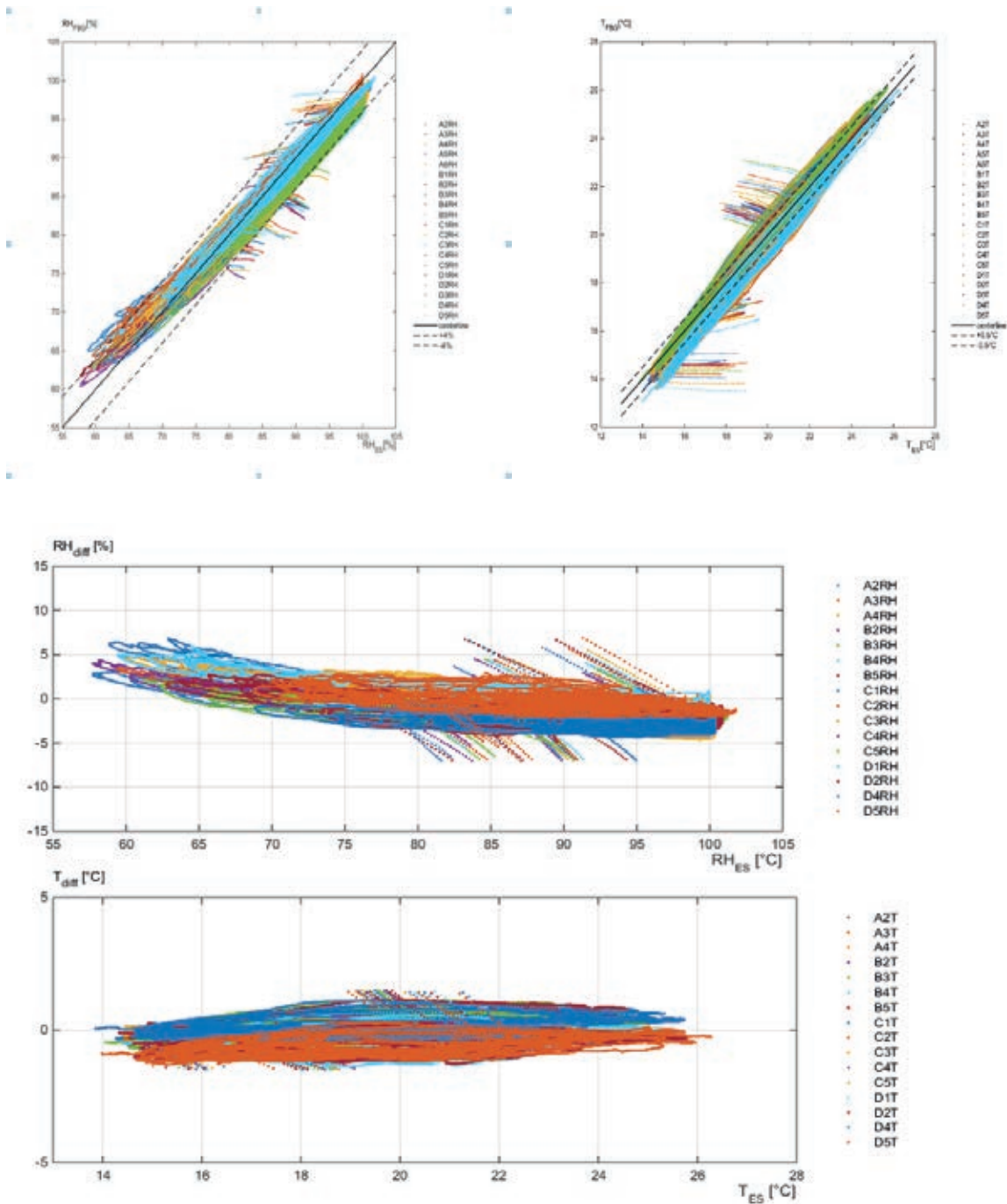
In Figuur 3.22 is te zien dat voor RV de differenties in veruit de meeste gevallen liggen binnen een gebied van $\pm 4\%$. Alleen voor enkele sensoren, mogelijk op dagen met hogere instraling loopt dit op tot $\pm 6\%$. Voor de temperatuur blijven de differenties beneden de $\pm 1.2^\circ\text{C}$.



Figuur 3.23 Cyclisch gemiddelde over 24 uur van gecorrigeerde FBG-sensoren en 2 gekalibreerde sensoren van 8-14 sept-2015.

Om de data voor langere tijd te vergelijken met de meetboxen (referentie) is wederom een cyclisch daggemiddelde plot gemaakt (Figuur 3.23). Voor temperatuur zien we nu dat de FBG meetdata voor zowel 's nachts als overdag goed samenloopt met de meetboxen. 's Nacht meten de meetboxen een iets lagere temperatuur dan overdag. Mogelijk komt dit door een iets hoger uitstralingseffect in vergelijking tot van de experimentele FBG behuizingen die beter geïsoleerd zijn. Voor RV zien we dat de FBG sensoren systematisch een 5% hogere RV meten.

In figuur 3.24 zijn de gecorrigeerde FBG meetdata geplot tegen de meetwaarden van de elektronische sensoren.



Figuur 3.24 Meetdata voor elektronische en FBG sensoren na correctie voor looptijd, uitgezet tegen elkaar en met 1:1 lijn (boven) en residu-plots (onder).

Kijkend naar de verschillen in RV (Figuur 3.24) dan zien we dat de FBG sensoren (op één na) tot 5% hoger (positiever) liggen in het lage RV bereik (tussen 55 en 70%) en dat ze ongeveer 2.5% lager liggen bij de hogere RV's (boven 80%). In het meest relevante gebied (>70%) blijven de verschillen binnen een band van $\pm 4\%$.

Bij de temperatuur is het verband voor de FBG sensoren over het hele meetgebied lineair en loopt dit gelijk met de elektronische sensoren. De meeste sensoren liggen in een band van $\pm 0.5^\circ\text{C}$ waarbij uitschieters bij specifieke sensoren kunnen oplopen tot $\pm 1.2^\circ\text{C}$.

3.2.4 Evaluatie nauwkeurigheid FBG sensoren

De intrinsieke nauwkeurigheid van de individueel gekalibreerde elektronische sensoren (met de Rotronic kalibratie rekening houdend) ligt in de orde van $\pm 0.4^\circ\text{C}$ en $\pm 1.3\%$ (zie § 3.1.4). Deze onzekerheid moet nog opgeteld worden bij de verschillen die gemeten zijn (aannemend dat fouten ongecorrigeerd zijn). Als we de pieken van het dynamische gedrag even buiten beschouwing laten, dan ligt de onzekerheid in de orde van $\pm 5.3\%$ en $\pm 0.9^\circ\text{C}$. Deze onzekerheid is bijna een factor twee ruimer dan de bekende haalbaarheid van de FBG sensoren (zie Tabel 3.6). Een uitspraak doen over de kwaliteit van de FBG sensoren (in absolute zin) in een praktijk situatie op basis van de gebruikte systematiek is dus eigenlijk niet goed mogelijk. Om die reden is ook naar de onderlinge meetverschillen tussen de FBG en elektronische sensoren gekeken.

Tabel 3.6

Samenvatting van de doelspecificaties voor de FBG (zie ook Tabel 2.1).

Parameter	Bekend haalbaarheid	Doelspecificaties
RV [%]	90...95	35 ...98
Δ RV [%]	3	<3
T [$^\circ\text{C}$]	15...35	0...45
Δ T [$^\circ\text{C}$]	0.5	0.1
Responstijd [min]	10	1...5

In het eindresultaat waarin de T en RV van de elektronische en de FBG sensoren worden vergeleken, en met namen in het verschil tussen de T en RV metingen zit een opeenstapeling van fouten:

De nauwkeurigheid van de elektronische sensor kalibratie

De ES sensoren zijn gekalibreerd in een z.g. kalibrator, een compacte kamer met een diameter van 12 cm en een diepte van 20 cm, waarin een instelbaar klimaat werd gerealiseerd. De lucht in dit klimaatkamertje wordt rondgepompt. De gradiënt in T/RV in dit kamertje wordt klein verondersteld, maar is niet bekend en blijft dus een onzekere factor, die achteraf niet corrigeerbaar is. Na kalibratie bleken alle meetwaarde van de ES sensoren binnen een band van 0.2°C met de referentie sensor te zitten. Over het temperatuurtraject van $5-45^\circ\text{C}$ schuift deze band 0.1°C op. Voor de RV zagen we bij lagere RV's een systematische afwijking tussen de ES sensoren en de Rotronix data. Dit terwijl de ES sensoren en de FBG sensoren in dat gebied dichter bij elkaar liggen. Dat werpt de vraag op of de Rotronix kalibrator, gebruikt op deze wijze, wel geschikt is of was.

De nauwkeurigheid waarmee de FBG sensoren zijn gekalibreerd in het lab

De FBG sensoren zijn in het lab gekalibreerd, maar daarvoor zijn alleen de korte glasvezels gebruikt. Ook deze kalibratie heeft een bepaalde nauwkeurigheid. In de praktijkevaluatie zijn ook langere fiberkabels voor aansluiting gebruikt, welke invloed bleken te hebben op de kalibratie.

De nauwkeurigheid waarmee de fiberlengte is gecorrigeerd

Een variatie in fiberlengte geeft een directe verschuiving c.q. offset in de temperatuurmeting. De temperatuurmetingen van de FBG sensoren bleken veel gevoeliger voor de fiberlengte dan de RV metingen. De FBG zijn getuned voor looptijd met ongecorrigeerde elektronische data⁶. Het advies zou zijn om de looptijdcorrectie als nog met gecorrigeerde temperatuur data van de elektronische sensoren uit te voeren.

De nauwkeurigheid van de timing van de metingen.

In de specificaties is verder te zien dat de FBG sensoren een responsietijd hebben van ca. 10 minuten, dit terwijl de elektronische sensoren veel sneller hun data geven (orde 1-2 minuten). Bij een analyse waarbij FBG en elektronische sensoren in real-time (op minuten basis) met elkaar vergeleken worden, kan dit ook tot niet-verwaarloosbare verschillen leiden.

De meetpunten (moment van bemonstering) van de elektronische sensoren en de FBG sensoren zijn niet isochroon. Het tijdsinterval van de FBG sensoren varieert iets, soms volgen twee metingen elkaar snel op. De FBG meetpunten zijn vertraagd t.o.v. van die van de elektronische sensoren. De vertraging varieert van ongeveer 100 – 300 seconden en ligt gemiddeld op 180 seconden.

Om deze laatste reden is de evaluatie (zie Figuur 3.24) nogmaals uitgevoerd voor data die over langere tijd gemiddeld zijn (over 1 uur). Daarbij is ook nog een vergelijk gemaakt voor het wel/niet toepassen van de individuele correctie van de sensoren om te zien welke invloed de kalibratie van de elektronische sensoren op de evaluatie heeft gehad.

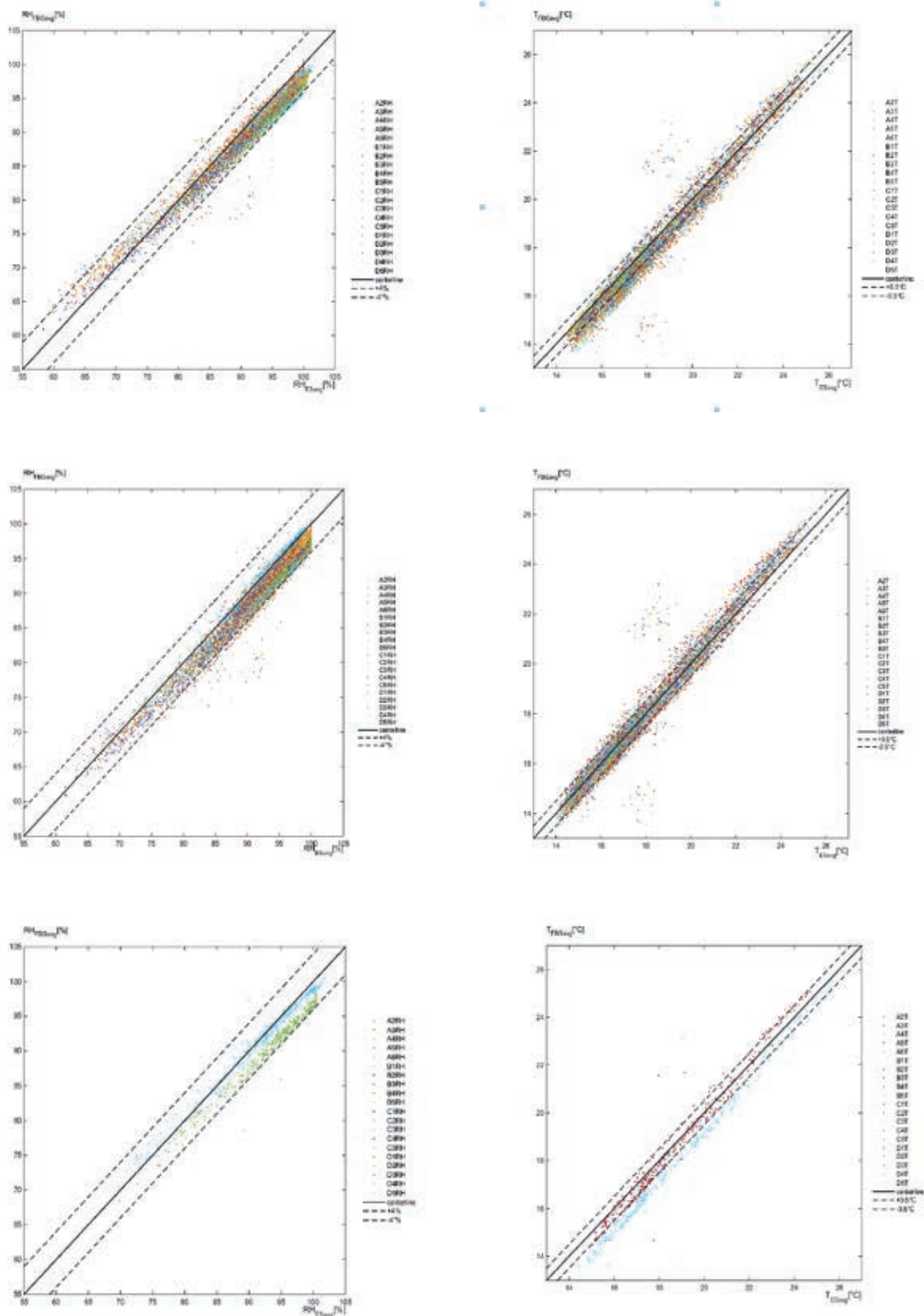
De uurgemiddelden van T

Om de metingen goed met elkaar te kunnen vergelijken, en om de tijdvertraging en alle ruis zoveel mogelijk te onderdrukken, is de gehele periode van september uitgemiddeld over intervallen van één uur. Op de data zijn eerst bewerkingen toegepast om uitschieters te verwijderen, data isochroon te maken en te filteren. De uitschieters zijn verwijderd met een mediaanfilter met een venster van 7 opeenvolgende datapunten. Het mediaan filter is sterk niet-lineair en verwijdert uitschieters volledig zonder vertragingen en middelingseffecten. Afhankelijk van het venster kunnen zo meerdere positieve en of afwisselende negatieve pieken verwijderd worden.

De data van alle sensoren is verder volledig isochroon gemaakt d.m.v. interpolatie (Matlab Interp1). Deze interpolatie levert een onzekerheid c.q. ruis op. De data is daarom uitgemiddeld met een lopend gemiddelde filter over een venster van 15 metingen (Matlab Smooth). Om de onregelmatigheid in timing zoveel mogelijk te onderdrukken is de data verder uitgemiddeld over intervallen van één uur.

De volgende figuren geven de analyse weer voor temperatuur en RV, voor alle sensoren, zowel voor met als zonder gebruik van gekalibreerde ES sensoren. Daarnaast is er een extra figuur toegevoegd waarbij de data voor twee enkele sensoren gegeven zijn.

⁶ De looptijd correctie heeft immers plaatsgevonden nog voordat de resultaten van de kalibratie van de elektronische sensoren heeft plaatsgevonden.



Figuur 3.25 Vergelijking van FBG en elektronische sensoren voor RV (links) en T (rechts), waarbij elektronische sensoren gekalibreerd zijn (boven), niet gekalibreerd (midden) en vergeleken voor twee typische sensoren (onder).

Uurgemiddelden met individuele kalibratie van T_{ES} en RH_{ES} .

Kijkend naar Figuur 3.25 zien we dat door toepassing van middeling de nauwkeurigheid licht verbeterd, maar niet substantieel vergeleken met de real-time vergelijking. De RV's liggen nu wel nagenoeg helemaal binnen een band van $\pm 4\%$. Voor temperatuur geldt ook een lichte verbetering, en blijven de sensoren veelal binnen een band maar moet toch de eerder bepaalde nauwkeurigheid van -0.8 tot $+0.5^\circ\text{C}$. De nauwkeurigheid moeten we daarom op $\pm 0.8^\circ\text{C}$ stellen.

De wolk van meetpunten kan een fout beeld geven doordat bijvoorbeeld een sensor sterk naar boven afwijkt en een andere sterk naar beneden. In de grafiek (Figuur 3.25 onder) is te zien dat sommige sensoren beter presteren dan anderen. De stippellijnen geven de foutzone van $+0.5$ en -0.5°C weer.

Uurgemiddelden zonder individuele kalibratie van T_{ES} en RH_{ES} .

De procedure is herhaald maar nu zonder de individuele kalibratie voor T_{ES} en RV_{ES} . Bij de T_{FBG} versus T_{ES} grafiek is een duidelijke toename in de spreiding te zien. Bij de RV_{FBG} versus RV_{ES} grafiek is ook een toename in de spreiding te zien maar bij de lagere RV waardes blijven de metingen nu binnen de $\pm 4\%$ marge. De FBG en de ES sensoren komen in het lage RV gebied onderling beter overeen dan met de Rotronix referentie sensor. Dit was in de kalibratie data ook al te zien.

Rekening houdend met de nauwkeurigheidsspecificatie van de elektronische sensoren (volgens specificaties: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ voor $T=5 - 45^\circ\text{C}$ en $\pm 2\%$ voor $RV= 35-90\%$), dan zou de nauwkeurigheid van de FBG sensoren in de orde kunnen liggen van $\pm 0.3^\circ\text{C}$ en $\pm 2\%$, aannemend dat meetfouten in beiden onafhankelijk van elkaar zijn. Daarmee zou de nauwkeurigheid van de FBG in dezelfde grootte orde liggen als van de elektronische sensoren.

Conclusie

Door de opstapeling van fouten is de nauwkeurigheid van de FBG sensoren moeilijk te beoordelen. De RV blijft vrijwel binnen de $\pm 4\%$ marge, de temperatuur binnen de $\pm 0.8^\circ\text{C}$. Een aantal individuele sensoren geven een duidelijk betere prestatie. De algemene indruk is dat de FBG sensoren ongeveer dezelfde prestatie hebben als de gecorrigeerde ES sensoren. De puntenwolk van alle sensoren liggen nog niet goed over elkaar, de correctie voor de fiberlengte kan dus nog verbeterd worden.

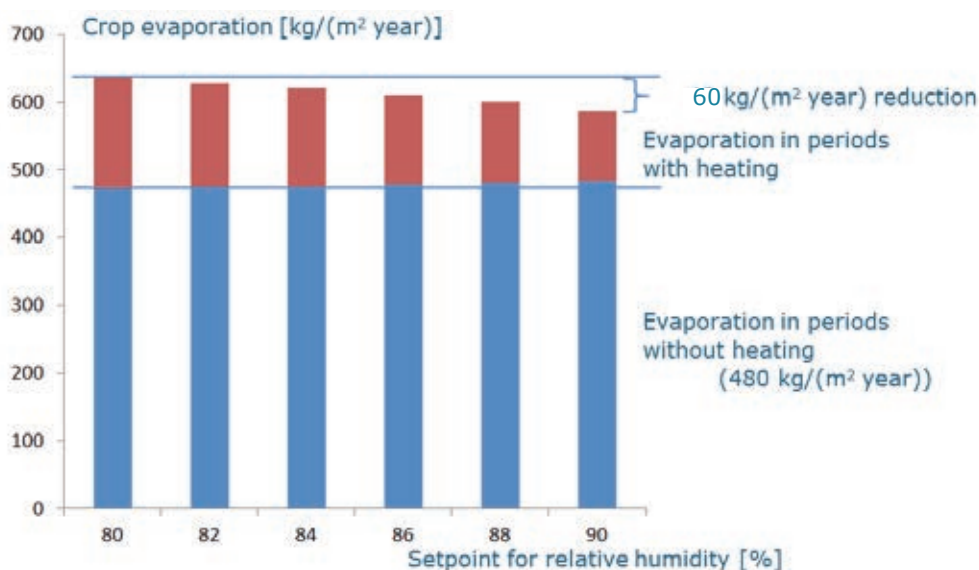
4 Analyse

4.1 Energiebesparing door een gedistribueerd meetgrid

Het zal duidelijk zijn dat een gedistribueerd meetgrid op zichzelf geen energiebesparing oplevert. Het energetisch voordeel van zo'n meetnet kan alleen worden behaald wanneer de nauwkeurigere informatie over de luchtvochtigheid wordt gebruikt om tijdens de perioden waarin de verwarming wordt gebruikt bij een gemiddeld hogere luchtvochtigheid te telen. Telers zijn beducht voor condensatie op het gewas en zorgen er daarom voor dat de luchtvochtigheid in de kas niet te hoog wordt. In verreweg de meeste kassen kan die luchtvochtigheid niet anders geregeld worden dan door de ramen en/of het energiescherm op een kier te zetten. In koude perioden van het jaar zal de temperatuur door het openen van ramen en/of energiescherm onder de gewenste ondergrens zakken en zal de verwarming aan of hoger worden gezet om het warmteverlies dat met het kieren van ramen of schermen gepaard gaat te compenseren.

Het aanhouden van een hogere luchtvochtigheid vermindert het energieverbruik dat met de vochtbeheersing gemoeid is langs twee wegen. In de eerste plaats neemt de gewasverdamping af bij een toenemende luchtvochtigheid en in de tweede plaats neemt het (voelbaar) warmteverlies per eenheid afgevoerd vocht af.

Onderstaande grafiek toont het eerste effect; de afname van de gewasverdamping bij een oplopende grens voor de luchtvochtigheid.

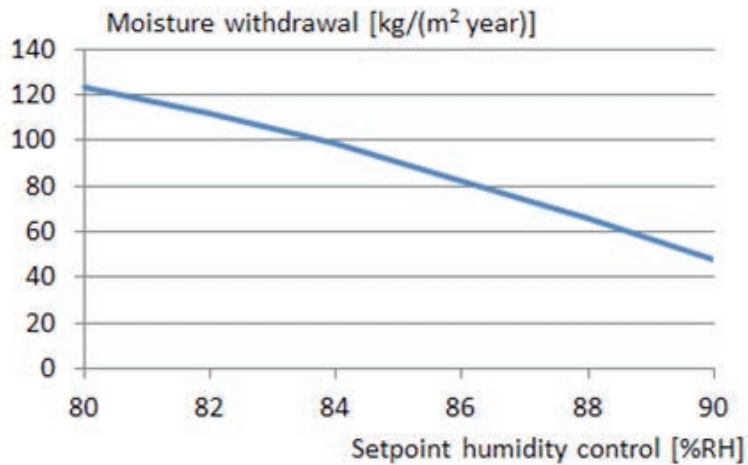


Figuur 4.1 Afname van de gewasverdamping bij een oplopende grens voor de luchtvochtigheid.

De jaarlijkse verdamping van een (onbelicht) tomatengewas bij een ingestelde luchtvochtigheidsgrens van 85% is 610 liter per m² per jaar. Met 'ingestelde luchtvochtigheidsgrens' wordt het punt bedoeld waarboven de teler ramen en/of schermen gaat openen om de vochtafvoer te vergroten. Dit betekent niet dat de luchtvochtigheid dan niet boven die grens uit komt want luchtvochtigheidsregelingen in kassen zijn altijd proportionele regelaars. Een proportionele regelaar geeft een actie die in een lineaire relatie staat ten opzichte van het setpoint. Afhankelijk van de sterkte van deze relatie wordt de overschrijding groot of klein, maar wordt nooit 0.

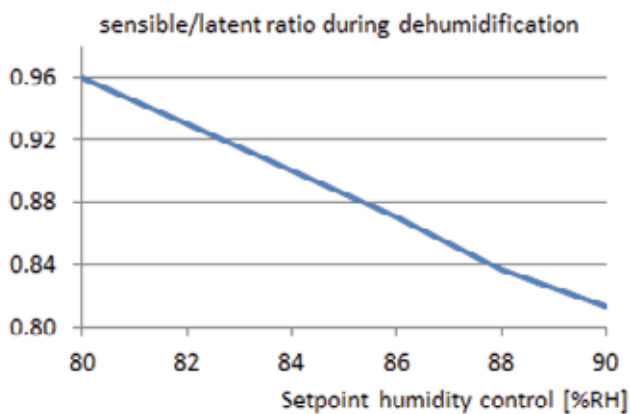
De grafiek laat zien dat het grootste deel van de verdamping, en dus ook het grootste deel van de vocht-afvoer plaatsvindt op momenten waarop er niet gestookt wordt. Vanuit het oogpunt van energiebesparing is dus alleen de verdamping in de periode met verwarming relevant en daar blijkt dat het gewas 60 liter minder gaat verdampen als de luchtvochtigheidsgrens oploopt over het traject van 80 tot 90% RV.

Minder verdamping leidt tot een afnemende behoefte aan ontvochtiging. Onderstaande grafiek laat de afname van de actieve ontvochtiging zien.



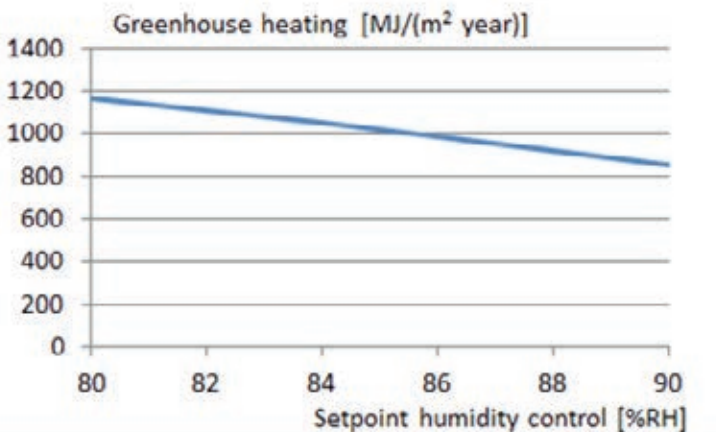
Figuur 4.2 Afname van de actieve ontvochtiging.

De toegenomen luchtvochtigheid leidt ook tot een verlaging van het aandeel voelbaar warmteverlies per eenheid latente warmte die afgevoerd wordt. Dit blijkt uit onderstaande grafiek.



Figuur 4.3 Voelbaar warmteverlies per eenheid latente warmte.

Beide effecten samen leiden tot een forse besparing, zoals blijkt uit onderstaande grafiek.



Figuur 4.4 Besparingspotentieel voor energie als functie van het gekozen setpoint voor ontvochtiging.

De afname is 350 MJ over dit gebied van 10%-punten verandering van het RV-setpoint. Hierdoor kan als vuistregel gesteld worden dat elke %-punt verhoging van het RV-setpoint in een moderne (onbelichte) glasgroententeelt ongeveer 3.5% energie of 1 m³ aardgas equivalenten aan energiebesparing oplevert.

In het Gezonde Kas project (Balendonck, 2014) is een gedistribueerd meetnet met 8 RV,T sensoren gebruikt om het klimaat in een tomatenkas actief te regelen. Dit was een kleine experimentele kas (Proefstation LWK-NRW Straelen (D), in de orde van grootte als de kas beschreven in dit rapport. De regeling die toegepast werd (de "Wandelende Meetbox"), werkte volgens het principe om te regelen op de plek met het laagste vochtdeficit, of te wel de hoogste RV. De RV's werden in drie verschillende stappen verhoogd (0,3 en 5%) naar resp. 85%, 88 en 90%. Deze regeling kan dus rekening houden met de variabiliteit van het klimaat. Bij de proeven zijn energiebesparingen van resp. -10%, +2% en +10% gerealiseerd. De 10% extra energie die gebruikt is bij de 0% verhoging van het set-point komt omdat de regeling op minimum vochtdeficit regelde en mede door de in-homogeniteit van het klimaat daardoor meer energie gebruikte. Bij 5% verhoging van de marge leverde het wel een besparing van 10% op. Het verschil (2 x 10%) is weliswaar minder dan de theoretisch haalbare 35%, maar daarvoor krijgt de teler wel meer zekerheid terug dat zijn gewas niet nat slaat op plekken waar het klimaat vochtiger is in zijn kas.

4.2 Business cases en economische analyse

Om glasvezeltechnologie voor monitoring van temperatuur en luchtvochtigheid en besturing van het kasklimaat in te zetten, is het zinvol na te gaan of dit toekomstperspectief kan hebben. De glasvezelsensoren worden daarbij vergeleken met de bestaande klimaatbox (referentiesituatie) en draadloze sensoren. Hieronder worden ze kort toegelicht.

Klimaatbox - Referentiesituatie

De huidige situatie van klimaatmonitoring op glastuinbouwbedrijven is door middel van een klimaatbox (voor temperatuur en relatieve vochtigheid). Er is 1 klimaatbox per afdeling van ca. 5000 m² (2 per ha). De klimaatboxen worden geventileerd. Het signaal van de meetbox gaat via bekabeling (1 kabel) naar de klimaatcomputer.

Draadloze sensoren

In deze situatie wordt de temperatuur en RV gemeten met een draadloze sensor (o.a. AgriSensys van Wireless Value). Hiermee is al 4-5 jaar ervaring in onderzoek en praktijk opgedaan. Een systeem voor 2 ha bestaat uit een basisstation met internetverbinding, range extender, 25 sensoren (in aparte behuizing) en userinterface met internet. De draadloze signalen worden opgevangen door een basisstation en zijn te bekijken via een webapplicatie. De sensorkastjes zijn niet geventileerd. Om een goede vergelijking te maken met de geventileerde klimaatbox wordt een extra sensor geplaatst in de klimaatbox. Met deze sensor is de temperatuurverhoging door instraling in niet geventileerde sensors weg te filteren. Hierdoor hoeven niet alle sensorkastjes geventileerd te worden. In deze case wordt er van uitgegaan dat de klimaatbox (als back-up) aanwezig is.

Glasvezelsensoren

Dit systeem bestaat uit glasvezelleidingen en 'sensoren' voor meting van temperatuur en luchtvochtigheid op basis van Fiber Bragg glasvezeltechnologie. De sensoren zitten in een speciaal ontwikkelde behuizing. Per ha zijn 20 sensoren nodig (op twee niveaus) en 2 glasvezelstrengen. De meetsignalen worden in de interrogator omgezet naar informatie t.b.v. de klimaatcomputer. De behuizing is niet geventileerd. Voor het ventileren van de behuizing is een extra kabel nodig voor aanvoer van stroom. Dit zou betekenen dat bij glasvezelsensoren twee leidingen nodig zouden zijn (glasvezel en stroomleiding). In de analyse is er van uit gegaan dat een ventilator niet nodig zal hoeven te zijn. De sensoren hangen tussen het gewas, waardoor extra aandacht moet zijn voor het efficiënt aanbrengen en verwijderen bij teeltwisseling.

Het is ook mogelijk om de sensoren alleen te gebruiken voor het ijken van het kasklimaat (en niet voor klimaatsturing). In deze studie wordt uitgegaan dat de glasvezelsensoren 'permanent' aanwezig zijn voor klimaatmonitoring en -sturing.

In deze case wordt er van uitgegaan dat de klimaatbox (als back-up) aanwezig is.

Voordelen gedistribueerde klimaatmonitoring

De voordelen van gedistribueerde meetsystemen komen tot uiting in een homogener klimaat en scherpere marges voor T en RV instellingen. Dit resulteert in een te verwachte energiebesparing, waarbij geen natslag optreedt en dus ook geen schimmelaantasting. Het productieniveau blijft daarmee op peil.

4.2.1 Economische parameters

Hieronder zijn de uitgangspunten vermeld voor de economische beoordeling van glasvezelsensoren t.o.v. klimaatboxen en draadloze sensoren (zie Tabel 4.1).

Op basis van de berekende energiebesparing (zie 4.2) en experimenten met draadloze sensoren (Balendonck, 2015) is verondersteld dat de voordelen op het terrein van energie voor glasvezelsensoren in dezelfde orde van grootte liggen. Er is uitgegaan van 10% energiebesparing door de RV setpoint met 3%-punten te verhogen t.o.v. de gangbare setpoint (=85% RV).

De meetsystemen worden economisch beoordeeld voor twee bedrijfstypen met een verschillende gasverbruik op jaarbasis (onbelichte teelt). (zie Tabel 4.2).

Tabel 4.1

Economische parameters simulatieberekening.

Omschrijving	Eenheid	Waarde	Bron, toelichting
Klimaatbox, incl. installatie			
Investering	€/ha	4000	Balendonck, 2015
Jaarkosten	€/ha	920	Afschr/onderh/rente: 23%
Draadloze sensor			
Basis station, 12 sensors/ha, range extender, web-applicatie			
Investering	€/ha	4500	Wireless Value BV Balendonck, 2015
Jaarkosten	€/ha	1035	Afschr/onderh/rente: 23%
Glasvezelsensor			
20 sensors, 4 fibers, 1 interrogator (incl. switch), behuizing, assemblage			
Investering	€/ha	5600	TNO en schatting
Jaarkosten	€/ha	1365	Afschr/onderh/rente: 23%
Installatie bij teeltwisseling (2 x 2 dgn, à 20 €/uur)	€/ha	640	Schatting
Energiebesparing			
Fysieke besparing	%	10	Bij 3%-punt RV setpoint stijging t.o.v. 85% (zie 4.2); Balendonck, 2015
Gasprijs	€/m ³	0,25	KWIN 2014-2015
Gasverbruik bedrijfstype 1	m ³ /m ²	30	KWIN 2014-2015
Gasverbruik bedrijfstype 2	m ³ /m ²	40	KWIN 2014-2015

4.2.2 Economie

In de economische analyse wordt de glasvezelsensor en de draadloze sensor bekeken in vergelijking met de huidige klimaatbox. Daar in alle cases de klimaatbox is meegenomen, worden de kosten van de nieuwe meetsystemen (draadloze sensor en glasvezelsensor) beschouwd in relatie tot de te verwachte energiebesparing. In Tabel 4.2 zijn de economische effecten van de draadloze sensor en de glasvezelsensor vermeld ten opzichte van de huidige situatie met klimaatboxen.

Zowel de draadloze als de glasvezelsensoren worden bij teeltwisseling verwijderd en vervolgens weer aangebracht. Echter bij de glasvezelsensoren is meer tijd benodigd, omdat de glasvezeldraden tussen het gewas hangen. Dit verwijderen/installeren moet zorgvuldig gebeuren, omdat de glasvezelsensoren kwetsbaar zijn. Dit kost extra tijd. In de economische simulatie is daarom gerekend met die extra tijd. De extra tijd is ingeschat op basis van ervaringen opgedaan in de experimenten.

Tabel 4.2

Effect van sensorsystemen op saldo van opbrengsten en kosten voor twee bedrijfstypen met een verschillend gasverbruiksniveau¹ t.o.v. huidige situatie met klimaatbox (€/ha).

Meetsysteem	Systeem		Bedrijfstype 1		Bedrijfstype 2	
	Jaarkosten	Energiebesparing	Saldo ³⁾	Energiebesparing	Saldo ³⁾	
	€/ha	€/ha	€/ha	€/ha	€/ha	
Draadloze sensor	1035	7500	6465	10000	8965	
Glasvezelsensor ²⁾	2005	7500	5495	10000	7995	

¹⁾ Bedrijfstype 1: 30 m³/m²; bedrijfstype 2: 40 m³/m².

²⁾ Er is bij de glasvezelsensoren rekening gehouden met extra jaarkosten t.b.v. arbeid voor het weghalen en aanbrengen van sensoren bij teeltwisseling.

³⁾ Saldo is het resultaat van energiebesparing minus jaarkosten meetsysteem.

Uit Tabel 4.2 blijkt dat het meetsysteem met draadloze sensoren een voordeel kan behalen van 6500 tot bijna 9000 €/ha, afhankelijk van het bedrijfstype. Bij het energie-intensieve bedrijfstype is het grootste voordeel te behalen door de grotere energiebesparing.

Voor glasvezelsensoren ligt er ook een toekomstperspectief. Het voordeel t.o.v. de huidige klimaatboxen is kleiner dan bij het systeem met draadloze sensoren, maar ligt tussen 5500 en 8000 €/ha. Het voordeel is bij de draadloze sensor ongeveer 1000 €/ha hoger dan bij de glasvezelsensor.

Vanwege het ontbreken van ervaringen met glasvezelsensoren in de praktijk, is nog onduidelijk wat het (af)breukrisico is tijdens de teelt en bij teeltwisseling.

Uitgaande van de veronderstelde energiebesparing (10%) mag de investering in glasvezelsensoren voor bedrijfstype 1 maximaal 30.000 en voor bedrijfstype 2 maximaal 40.000 €/ha bedragen (investeringsruimte). Deze bedragen liggen ruim boven de begrote investering.

4.2.3 Gevoeligheidsanalyse

In Tabel 4.3 zijn de effecten van minder gunstige uitgangspunten voor investering (10% hoger) en % energiebesparing (5% i.p.v. 10%) vermeld op het saldo (van opbrengsten en kosten).

Tabel 4.3

Effect van sensorsystemen op saldo van opbrengsten en kosten voor twee bedrijfstypen met verschillend gasverbruiksniveau¹ t.o.v. huidige situatie met klimaatbox (€/ha).

Meetsysteem	Bedr.type 1		Bedr.type 2	
	Saldo	Saldo t.o.v. basis	Saldo	Saldo t.o.v. basis
	€/ha	€/ha	€/ha	€/ha
Draadloze sensor				
Basis situatie	6465	-	8965	-
10% hogere investering	6360	-105	8860	-105
5% energiebesparing	2715	-3750	3965	-5000
Glasvezelsensor*				
Basis situatie	5495	-	7995	-
10% hogere investering	5295	-200	7795	-200
5% energiebesparing	1745	-3750	2995	-5000

¹⁾ Bedrijfstype 1: 30 m³/m²; bedrijfstype 2: 40 m³/m².

Uit Tabel 4.3 volgt dat het effect van een hoger investeringsbedrag (10%) leidt tot een lager saldo van ruim 100 €/ha voor de draadloze sensor tot 200 €/ha voor de glasvezelsensor t.o.v. de uitgangs- of basissituatie.

De aanname van te verwachten energiebesparing is niet zo hard. Een kleinere energiebesparing (i.c. 5% bij 1,5% RV setpoint stijging) verlaagt het saldo van opbrengsten en kosten substantieel (3750 tot 5000 €/ha, afhankelijk van het bedrijfstype). Voor de glasvezelsensoren daalt het saldo naar 1750 respectievelijk bijna 3000 €/ha. Voor de draadloze sensor ligt het saldo voor beide bedrijfstypen ca. 1000 €/ha hoger.

5 Discussie

Elektronische sensoren

De elektronische sensoren (en ook de standaard meetboxen Ref1 en ref2) zijn in de praktijkproef gebruikt als indirecte referentiesensor als achteraf gekalibreerd op basis van een Rotronics kalibrator. Deze individuele kalibratie leverde vrij hoge nauwkeurigheden op. Echter, er is ook een vergelijking tussen de gelijkheidstest in de doos vooraf en de eindkalibratie gedaan. Daaruit is naar voren gekomen dat de sensoren op de langere tijd mogelijk drift vertonen in de orde grootte van de nauwkeurigheidsspecificatie van de sensoren.

Verder hebben we bij lage RV's oplopend verschillen tussen de elektronische sensoren en de Rotronix kalibrator gezien, welke in een 2^{de} orde vergelijking gecorrigeerd zijn. In de vergelijking tussen elektronische sensoren en FBG sensoren zagen we dit oplopen niet. Daarmee reist de vraag of de Rotronix kalibratie op de juiste wijze is uitgevoerd.

Daaruit is de voorzichtige conclusie getrokken dat de individuele kalibratie mogelijk niet zinvol is. Alleen een herhaalde kalibratie over langere termijn kan hier meer uitsluitel over geven. Vooralnog is het wellicht beter om voor de elektronische sensoren de standaard specificatie te gebruiken. Dit laatste is daarom ook uiteindelijk gebeurd.

Glasvezelsensoren

Het met de hand coaten van de fibers leidt tot een iets lagere reproduceerbaarheid van de nauwkeurigheid van de gemeten waarden. De verwachting is dat een automatische coatingprocedure de reproduceerbaarheid significant kan verhogen.

De kalibratieprocedure kan verbeterd worden. De gebruikte klimaatkamer was zeer stabiel, maar de lay-out van de fibers dienen exact gelijk te zijn aan die in de uiteindelijke opstelling (in dit geval in de kas). Dit is vooral van belang om de invloed van de fiberlengte te verdisconteren, die tot een extra golflengteverschuiving leidt. Als de grootte van dit effect beter bekend en reproduceerbaar is, kan de kalibratieprocedure in de toekomst vereenvoudigd worden. Binnen het praktijkexperiment is voor het bepalen van de correctie gebruik gemaakt van de elektronische sensoren omdat er geen alternatief was. Hoewel deze sensoren achteraf gecontroleerd zijn in een gekalibreerde meetkamer, waren deze op het moment van meetsessie 2 gekalibreerd volgens de specificatie (standaard kalibratie), en hadden deze dus mogelijk een lagere nauwkeurigheid.

De experimentele behuizingen waren zo ontworpen om zowel met de elektronische als met de FBG sensoren op één en dezelfde plek te kunnen meten. De glasvezelsensoren zijn erg fragiel. Ook, zoals later is gebleken bij het veranderen van de inklemming, kunnen externe krachten de meting sterk beïnvloeden. Om de glasvezelsensoren te beschermen tegen directe extreme invloeden is er voor gekozen om een robuuste behuizing rond de sensoren aan te brengen. Indien sensoren in een behuizing geplaatst worden, om opwarming te voorkomen, is dan een ventilator nodig om de sensoren de werkelijke luchttemperatuur en -vochtigheid te kunnen laten meten. Het potentiële voordeel van het hebben van een lange glasvezelkabel die eenvoudig in de kas aangebracht kan worden, vervalt daarmee eigenlijk. In de economische analyse is rekening gehouden worden met een geventileerde behuizing, wat tot hogere kosten voor materialen leidt. Binnen het onderzoek zijn echter geen experimenten uitgevoerd met losse glasvezelsensoren (zonder behuizing). Er is daarom niets te zeggen over bijvoorbeeld de effecten op de meting van directe instraling door de zon, maar ook niets over het praktische gebruik van losse glasvezelsensoren. Daarom is nog niet duidelijk of een behuizing nodig is, dan wel hoe die er praktisch uit zou moeten zien.

Op een aantal vragen is nog geen antwoord gekomen. We weten voornamelijk niet wat er gebeurt als de sensoren nat worden bij 100% RV. Is het drogen een reversibel proces, en hoe lang zal dit duren? We verwachten we wel dat het proces reversibel is. De duur van een eventuele "black-out" zal afhangen van de omgevingsfactoren. Ook is nog geen antwoord gekregen op de vraag hoe de sensoren reageren op een beregening, het toedienen van nutriënten via die beregening, het toedienen (spuiten) van gewasbeschermingsmiddelen of bijvoorbeeld de toepassing van zwavel.

Er is geen uitvoerige controle uitgevoerd voor het kalibratieverloop op de lange termijn (drift), door op regelmatige tijdstippen de kalibratie te controleren. Wel is er over meerdere maanden gemeten, en is er aan het einde van de experimenten een vergelijk gemaakt met de elektronische sensoren die op hun beurt weer vergeleken zijn met een gekalibreerd instrument. Over de meetperiode zijn geen grote effecten (verloop) waargenomen.

Er is geen controle uitgevoerd wat het effect op de meting is als de temperatuur in de kas langere tijd boven de 35 graden uitkomt.

Elektronische sensoren gemonteerd in een behuizing hebben last van instraling ten gevolge van de zon. Van glasvezel sensoren bestond de verwachting dat deze invloed op zijn minst veel kleiner zou zijn als de glasvezel in de vorm van een "kale" draad toegepast zou kunnen worden. Echter omdat er toch vanwege de fixatie van de glasvezel een behuizing nodig met ventilatie is, is de invloed van instraling op de sensoren niet getest. Dit laatste is ook niet getest voor situaties waarbij uitstraling naar een heldere hemel mogelijk is. Elektronische sensoren zijn daar overigens ook gevoelig voor.

Energiebesparing versus voorkomen van ziekten

Het is onzeker of de veronderstelde energiebesparing (oplopend tot 10%) in praktische situaties kan worden behaald. De toepassing van de "wandelende meetbox" (Balendonck *et al.* 2014) heeft laten zien dat er zeker potentie is om energie te besparen, maar dit is vooralsnog alleen in een kleine onderzoekkas bij tomaat geconstateerd. De werkelijke energiebesparing hangt sterk af van een aantal factoren, bijvoorbeeld zoals de mate waarin het klimaat inhomogeen is en of de teler dan meer of minder risico wil lopen. Uit de berekeningen blijkt namelijk dat een lagere RV setpoint verhoging (teler wil minder risico lopen) de energiebesparing verkleint en economisch sterk doorwerkt in het saldo van opbrengsten en kosten. Energiebesparing alleen zal daarom bij telers mogelijk niet de enige drijfveer zijn om een sensornetwerk aan te schaffen. Het feit dat er voorkomen kan worden dat ziekten optreden, of het risico op ziekten verkleind kan worden, zal zeker mee wegen voor aanschaffing. Het vertalen van deze risicoverlaging naar een economisch voordeel is echter lastig. Telers zelf kunnen nauwelijks inschatten wat hun derving is ten gevolge van vochtschaden aan het gewas (ziekten), en geven schattingen uiteenlopend van 0 tot 5%. In de praktijk kan het echter zeer desastreuze gevolgen hebben, in het ultieme geval tot verlies van een gehele partij als die volledig wordt afgekeurd. Dit kan zelfs uitmonden tot een verlies van een complete markt. Voorbeelden daarvan zijn bekend waarbij de volledige Russische markt op slot na het vinden van Botrytis sporen in Gerbera's. Dit maakt dat telers vaak erg huiverig zullen zijn om een hoge energiebesparing na te streven door op het randje van hoge luchtvochtigheden te telen. Hun eerste doel is daarom te streven naar een homogener klimaat in hun kassen.

Economische analyse en kansen voor toekomstige ontwikkelingen voor glasvezelsensoren

Uit de simulatieberekeningen blijkt dat een gedistribueerd meetnet voor temperatuur en RV economisch interessant is voor zowel de draadloze als de glasvezelsensor. De analyse laat zien dat elektronische sensoren in economisch opzicht, maar ook uit oogpunt van praktische uitvoerbaarheid op dit moment een gunstiger perspectief bieden dan een meetnet met glasvezelsensoren. Bij een energiebesparing van 2,5% schommelt het saldo bij de glasvezelsensoren rond het break-even point.

In de economische analyse is er van uitgegaan dat er één teeltwisseling per jaar is. Voor andere teelten (bv komkommer) zou dit zelfs vaker kunnen plaatsvinden en dus hogere arbeidskosten betekenen voor glasvezelsensoren.

Echter, deze conclusie is gebaseerd op een vergelijking van twee verschillende meetprincipes in een verschillende fase van ontwikkeling. De elektronische sensoren zijn al beschikbaar voor de tuinbouw (TRL >8⁷), en voor de glasvezelsensoren is een experimentele set gebruikt (TRL ~6). Deze conclusie is daarom niet volledig, en gedeeltelijk gebaseerd op grove inschattingen, en moet daarom ook in een perspectief gezet worden door ook naar de toekomstpotentie van de technologie te kijken.

⁷ TRL = Technology Readiness Level (Schaal:1-9).

In tegenstelling tot met de elektronische sensor, zijn met de glasvezelsensoren in de glastuinbouw, nog weinig onderzoeks- en geen praktijkervaringen opgedaan. Tijdens de praktijkproeven is gebleken dat de installatie van de glasvezelsensoren met zorg en aandacht moet gebeuren, en dat installatie en de-installatie (opbouwen en afbreken voor teeltwisselingen) nogal wat tijd kost. Alhoewel er in de proef geen uitval ten gevolge van breuk in de glasvezel is geconstateerd, is het in de telerspraktijk niet uit te sluiten dat zoiets kan gebeuren. Op dit moment lijkt de elektronische sensor daarom aantrekkelijker. Echter, er worden fibers gebruikt in minimaal even zware omstandigheden bijvoorbeeld in de olie- en gasindustrie waar optische sensoren onder zeer hoge temperatuur en druk worden toegepast. Ook liggen er fibers op de bodem van de oceaan voor communicatie, en er zijn militaire toepassingen waar tanks over fibers heen kunnen rijden zonder dat de fibers daar iets van merken. Het is dan ook niet ondenkbaar dat een uiteindelijk verkoopbaar glasvezelmeetsysteem voor de glastuinbouw veel robuuster en eenvoudiger hanteerbaar zal zijn dan het huidige (prototype) experimentele systeem.

In de economische analyse is niet meegenomen dat er een ontwikkeling gaande is naar veel goedkopere FBG's en interrogators, en is systeemoptimalisatie ook maar tot op zekere hoogte meegenomen. Hier liggen voor de toepassingen van glasvezelsensornetwerken zeker nog kansen.

Verder is het grote voordeel dat op een en dezelfde interrogator meerdere glasvezels, eventueel extra FBG's voor verschillende type sensoren aangesloten kunnen worden onbenut gelaten, zoals bijvoorbeeld het toevoegen van sensoren voor CO₂ (of andere parameters). In dan geval heb je voor minimale kostenverhoging een extra meetsysteem.

6 Conclusie

Elektronische sensoren

Het is gebleken dat de elektronische sensoren alvorens die in een klimaatregeling gebruikt worden, moeten worden gecontroleerd op werking, maar liefst ook gekalibreerd. Om de sensoren als referentie in dit onderzoek te gebruiken zijn deze individueel gekalibreerd en gecorrigeerd voor temperatuur met een lineaire correctie, en voor RV met een 2^{de} orde correctie. Na kalibratie kwamen alle T-waarden binnen een band van 0.3°C rondom de referentie temperatuur te liggen, en alle RV-waarden binnen een band van 0.8% rondom referentie RV. Rekening houdend met een nauwkeurigheid van de kalibrator kon voor de elektronische sensoren een absolute meetnauwkeurigheid van $\pm 0.4^\circ\text{C}$ en $\pm 1.3\%$ aangehouden worden over het gehele bereik.

Glasvezelsensoren

In de analyse is gekeken naar de nauwkeurigheid van de glasvezelsensoren waarbij de gekalibreerde elektronische sensoren als referentie zijn gebruikt. Tijdens de tweede meetperiode, na correctie van de data voor looptijd, bleken de verschillen tussen de glasvezelsensoren en elektronische sensoren te liggen in de orde van $\pm 1.1^\circ\text{C}$ en $\pm 5\%$, waarbij alleen de vergelijking is gemaakt in de periode dat er nagenoeg geen dynamische verschijnselen in de kas waren. De onzekerheid voor de FBG metingen (in absolute zin) ligt daarmee in de orde van $\pm 5.3\%$ en $\pm 0.9^\circ\text{C}$, welke veel groter is dan de gewenste doelnauwkeurigheid. De conclusie is dat de gebruikte vergelijkmethode niet geschikt is om met de gewenste nauwkeurigheid een goede vergelijking te maken.

Een directe vergelijking tussen de FBG en elektronische sensoren leert dat over het hele bereik de verschillen binnen de $\pm 0.8^\circ\text{C}$ en $\pm 4\%$ blijven. De algemene indruk bestaat daarmee dat de FBG sensoren ongeveer dezelfde prestatie hebben als de gecorrigeerde ES sensoren.

Energiebesparing

Een gedistribueerd meetgrid op zichzelf levert geen energiebesparing op. Het energetisch voordeel van zo'n meetnet kan alleen worden behaald wanneer de nauwkeurigere informatie over de luchtvochtigheid wordt gebruikt om bij een gemiddeld hogere luchtvochtigheid te telen tijdens de perioden waarin de verwarming wordt gebruikt.

Telers zijn beducht voor condensatie op het gewas en zorgen er daarom voor dat de luchtvochtigheid in de kas niet te hoog wordt. In verreweg de meeste kassen kan die luchtvochtigheid niet anders geregeld worden dan door de ramen en/of het energiescherm op een kier te zetten. In koude perioden van het jaar zal de temperatuur door het openen van ramen en/of energiescherm onder de gewenste ondergrens zakken en zal de verwarming aan of hoger worden gezet om het warmteverlies dat met het kieren van ramen of schermen gepaard gaat te compenseren.

Het aanhouden van een hogere luchtvochtigheid vermindert het energieverbruik dat met de vochtbeheersing gemoeid is langs twee wegen. In de eerste plaats neemt de gewasverdamping af bij een toenemende luchtvochtigheid en in de tweede plaats neemt het (voelbaar) warmteverlies per eenheid afgevoerd vocht af. Als vuistregel kan gesteld worden dat elke %-punt verhoging van het RV-setpoint in een moderne (onbelichte) glasgroententeelt ongeveer 3.5% energie of 1 m³ aardgas equivalenten aan energiebesparing oplevert.

Economische analyse

De economische haalbaarheid van sensornetwerken in kassen is beoordeeld met het doel energie besparingen te realiseren. Bij de economische analyse is van een basissituatie uitgegaan met 10% energiebesparing (3%-punt RV setpoint stijging t.o.v. 85% RV). Twee bedrijfstypen qua energieverbruik: 30 m³/m² en 40 m³/m² (een onbelichte teelt) zijn meegenomen. Bij deze studie is het toegepaste experimentele glasvezelmeetsysteem vergeleken met bestaande draadloze, elektronische meetsystemen.

Uit simulatieberekeningen blijkt dat een gedistribueerd meetnet voor temperatuur en RV economisch interessant is voor zowel de elektronische als de glasvezelsensor. Investeren in een gedistribueerd meetnet van temperatuur en RV levert behalve een energiebesparing ook een economisch voordeel op. Elektronische sensoren bieden in economisch opzicht, maar ook uit oogpunt van praktische uitvoerbaarheid een gunstiger perspectief dan glasvezelsensoren. Dit voordeel is ongeveer 1000 €/ha groter bij een meetsysteem met draadloze elektronische sensoren dan met de huidige experimentele glasvezelsensoren.

Het is onzeker of de veronderstelde energiebesparing van 10% in praktische situaties kan worden behaald. Dat hangt sterk af van een aantal factoren, bijvoorbeeld zoals de mate waarin het klimaat inhomogeen is en of de teler dan meer of minder risico wil lopen. Uit berekeningen blijkt dat een lagere RV setpointverhoging de energiebesparing verkleint en economisch sterk doorwerkt in het saldo van opbrengsten en kosten. Bij 2,5% energiebesparing schommelt het saldo bij de glasvezelsensor rond het break-even point.

Elektronische sensoren bieden in economisch opzicht, en uit oogpunt van praktische uitvoerbaarheid op dit moment weliswaar een gunstiger perspectief dan een meetnet met glasvezelsensoren. Echter, er moet opgemerkt worden dat een meetnet met glasvezelsensoren tegen weinig meerkosten kan worden uitgebreid tot grotere oppervlakten, maar ook met andere sensortypes. Bij doorontwikkeling naar goedkopere en meer robuustere glasvezeltechnieken en uitbreiding van de glasvezeltoepassingen wordt dit voordeel kleiner en zou deze economische beoordeling opnieuw gemaakt moeten worden.

Literatuur

Balendonck, J. 2014.

De wandelende meetbox zet eerste stappen. Wageningen-UR Glastuinbouw, in: Kastechniek, september 2014.

Boersma, A., P. Toet, L. Schriek, 2015.

Report of Fibre Optic Temperature and Humidity sensors in greenhouses, TNO report, Delft, 14-10-2015.

Balendonck, J., 2015.

De „Wandelende Klimaatbox“: Draadloze sensornetwerken in de kas. Lezing NVTL studiedag, 10 maart 2015, Hof van Wageningen.

Vermeulen, P. , 2014.

Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw; Kengetallen voor Glasgroenten, Snijbloemen en Pot/perkplanten. GTB-5067, Bleiswijk.

Visser, B., Wireless Value BV (telefonisch contact).

Wireless Value. Analyse Nauwkeurigheid Sensoren Wireless Value. Intern datablad van Wireless Value, Emmen.

www.agrisensys.com.

Bijlage 1 Specificaties elektronische sensoren

De sensoren van AgriSensys maken gebruik van de Sensirion chip SHT75. De specificaties van de fabriek geven daarvoor de volgende waarden:

- Voor relatieve vochtigheid : $\pm 1,8\%RH$ from 10% to 90%RH; $\pm 4\%RH$ otherwise
- Voor temperatuur : $\pm 0,3^{\circ}C$ @ $25^{\circ}C$, $\pm 0,5^{\circ}C$ from $0^{\circ}C$ to $+50^{\circ}C$,
 $\pm 1,2^{\circ}C$ from $-20^{\circ}C$ to $+80^{\circ}C$

Meer in detail is het gespecificeerd in de volgende figuren:

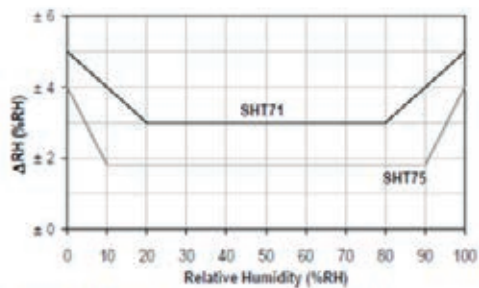


Figure 2: Maximal RH-tolerance at 25°C per sensor type.

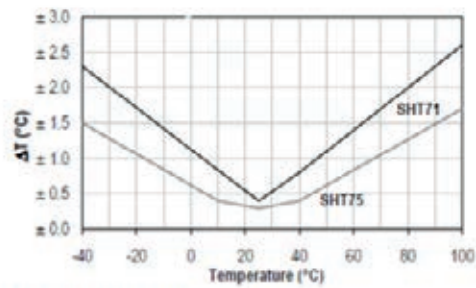


Figure 3: Maximal T-tolerance per sensor type.

Uit: Document Wireless Value

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen UR Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wageningenur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport GTB-1392

Wageningen UR Glastuinbouw initieert en stimuleert de ontwikkeling van innovaties gericht op een duurzame glastuinbouw en de kwaliteit van leven. Dat doen wij door toepassingsgericht onderzoek, samen met partners uit de glastuinbouw, toeleverende industrie, veredeling, wetenschap en de overheid.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.