

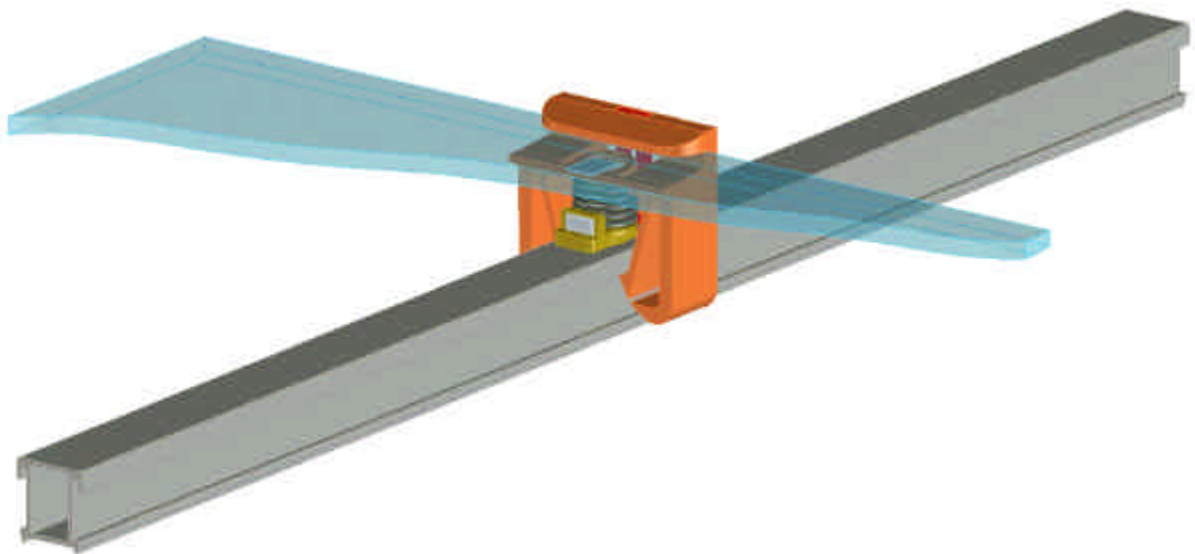
OKE-SERVICES

Nieuwstraat 29 - 5611 DA Eindhoven
Telefoon: 040-2445262 – Fax: 040-2464133 - Email: oke@euronet.nl
Web: <http://www.pv-wirefree.com>

Projectrapportage

Haalbaarheidsstudie PV-wireless

November 2002



Studie uitgevoerd met subsidie vanuit het
programma Nieuw Energieonderzoek (NEO)
NEO-projectnummer 0268-02-03-02-0002



Voorwoord

Nu iets meer dan een jaar geleden – in de trein van München naar Eindhoven terugkerend van de *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* – maakte ik de eerste schetsen van een PV-wireless systeem. Ik was ervan overtuigd dat het mogelijk moest zijn het draagframe te gebruiken als stroomgeleider, het aantal DC-componenten te minimaliseren en tegelijkertijd met een zeer gering aantal componenten een eenvoudige wijze van installatie te verzinnen. Voor mijn gevoel zat daarin niet het probleem. Nee, dat zat immers in het overtuigen van PV-deskundigen dat het parallel schakelen van PV-modules een betere keuze is dan het – zoals nu door iedereen wordt gedaan – in serie schakelen van PV-modules. Met andere woorden ik moest hen overtuigen dat ooit – in een ver verleden – een verkeerde weg is ingeslagen, die diverse nadelen met zich meebrengt en bovendien additionele (veiligheids)eisen stelt, waardoor PV-systemen onnodig (te) duur zijn geworden.

Maar de eerste die ik – overigens vrij eenvoudig – overtuigde was Irene de Jong, die haar onvoorwaardelijke medewerking toezegde. Door haar enthousiasme en ondersteuning durfde ik het onzekere PV-wireless ontwikkelingstraject – met subsidie-aanvragen en verslagen – wel aan.

Om de echte PV-deskundigen te overtuigen heb ik in het voorjaar van 2002 een theoretisch artikel geschreven over de veiligheidsaspecten alsmede voor- en nadelen van parallel en in serie schakelen van PV-modules. Met dit artikel in de hand heb ik onder andere gesproken met Frank Witte van Novem en Wim Sinke van het ECN. En met succes.

Novem bleek bereid een haalbaarheidsonderzoek naar het concept – dat we in eerste instantie PV-wireless doopten – financieel te ondersteunen met een subsidie vanuit het *Nieuwe Energieonderzoek programma* (NEO). En laten we eerlijk zijn, zonder die financiële ondersteuning had ik onmogelijk zoveel tijd vrij kunnen maken voor het verkennen – en deels uitwerken – van PV-wireless.

Inmiddels was ECN zo geïnteresseerd geraakt in het concept – dat we bij nader inzien toch maar PV-wirefree noemden, dat zij – mede in het kader van het ECN-project *Innovatieve integratietechnieken* – wilden participeren in de ontwikkeling van het concept; ECN maakte menskracht en middelen vrij voor een actieve bijdrage aan deze verkennende fase. Hierdoor kreeg de studie een bredere basis, waarbij beroep kon worden gedaan op de bij ECN aanwezige kennis uit diverse disciplines. Daarnaast waren natuurlijk ook de bijdragen van de inmiddels andere partners onontbeerlijk: Oskomera, NKF Electronics alsmede van Bear, TNO-Bouw en Van Dijk b.v. Door de bijdragen van al deze partijen kon het project succesvol worden afgerond.

Maar het hoogtepunt was voor mij de presentatie van PV-wirefree op de *PV for Europe* conferentie in oktober 2002 in Rome. Door de bijdragen van ECN, NKF Electronics en Oskomera konden we ons een grote stand veroorloven van zes meter breed, alwaar we het concept in “volle breedte” konden presenteren. De reacties waren overweldigend, en PV-fabrikanten bleken grote interesse te hebben voor het concept. Voor mij de kroon op het werk.

Het zal duidelijk zijn. Mijn dank gaat uit naar al degenen die openstonden voor het concept, voor deze nieuwe weg van ontwerpen van PV-systemen, en ook nog bereid waren daarin te investeren: Novem, de projectpartners en Irene de Jong.

Binnenkort zal stap twee op deze nieuwe PV-weg worden gezet. Op 1 januari 2003 zal het proof-of-principle project van start gaan, dat eveneens wordt ondersteund door Novem, maar nu vanuit het DEN-programma. In de komende twee jaren zullen de PV-wirefree componenten en het concept als geheel uitvoerig en intensief worden getest en worden (uit)ontwikkeld. Kortom, over twee jaar kan stap drie worden gezet: marktintroductie van PV-wirefree. Ik verheug me er nu al op.

Henk Oldenkamp, november 2002

Samenvatting

De prijs van PV-systemen bedraagt momenteel ca. € 6/Wp, waarvan ca. 60% voor rekening komt van de zonnepanelen zelf en 15% voor de inverter. Het resterende deel (25%) betreft de kosten van installatiematerialen (zoals kabels, connectoren), bevestigingsmaterialen, de menskosten van de installatie etc. Deze “overheadkosten” van PV-systemen worden over het algemeen aangeduid als BOS-kosten (BOS = Balance Of System). Voor het jaar 2020 wordt verwacht – met name door een sterke daling van kosten van PV-cellen en PV-panelen – dat de bijdrage van de BOS-kosten aan PV-systemen zal zijn gestegen tot 40%, omdat geen daling van deze BOS-kosten wordt voorzien. PV-wireless beoogt een substantiële bijdrage te leveren aan de daling van de kosten van PV-systemen, en met name de BOS-kosten.

Het DC-gedeelte van een PV-systeem waarin PV-modules in serie zijn geschakeld bestaat uit een groot aantal componenten, die ervoor moeten zorgen dat het systeem onder alle omstandigheden goed en veilig blijft functioneren. De basisgedachte achter het concept PV-wireless is om de functies die nu in een PV-systeem door verschillende componenten worden vervuld te integreren in nieuwe – goedkope - componenten, en tegelijkertijd PV-systemen inherent veilig te maken.

Het doel van onderhavige haalbaarheidsstudie, dat is uitgevoerd met subsidie vanuit het NEO-programma, was na te gaan of PV-wireless haalbaar is, waartoe antwoord wordt gegeven op de volgende vragen:

- Is de beoogde integratie van functies mogelijk? En zo ja, hoe dienen de nieuwe PV-wireless componenten uitgevoerd te worden?
- Is het met PV-wireless mogelijk een groot aantal componenten dat nu wordt toegepast in PV-systemen weg te laten?
- Is PV-wireless veilig en voldoet het concept aan vigerende normen?
- Is PV-wireless energetisch vergelijkbaar met vigerende PV-systemen?
- Leidt toepassing van PV-wireless inderdaad tot een substantiële kostenverlaging?

Uit de studie blijkt allereerst dat ervoor gekozen moet worden de PV-modules parallel te schakelen en niet meer in serie, zoals dat bij huidige PV-systemen wordt gedaan. In parallel geschakelde systemen blijft de spanning van het PV-systeem altijd beneden 21 Volt, een inherent veilige spanning, ook bij grote stromen. Een groot aantal componenten dat is toegevoegd om de veiligheid te garanderen juist vanwege de hoge spanningen van het PV-systeem worden daarmee overbodig.

De componenten van een PV-systeem waarin de PV-modules in serie zijn geschakeld zijn weergegeven in Figuur 1. Tevens is aangegeven – door middel van een kruis - welke componenten worden geïntegreerd in nieuwe (goedkope) PV-wireless-componenten en welke componenten overbodig worden door toepassing van PV-wireless. Figuur 1 laat zien dat een groot aantal componenten in een normaal seriegeschakeld PV-systeem wordt vervangen door twee nieuwe PV-wireless componenten: de stroombus en de moduleconnector. Daarnaast wordt de PV-module aangepast: het PV-wireless laminaat.

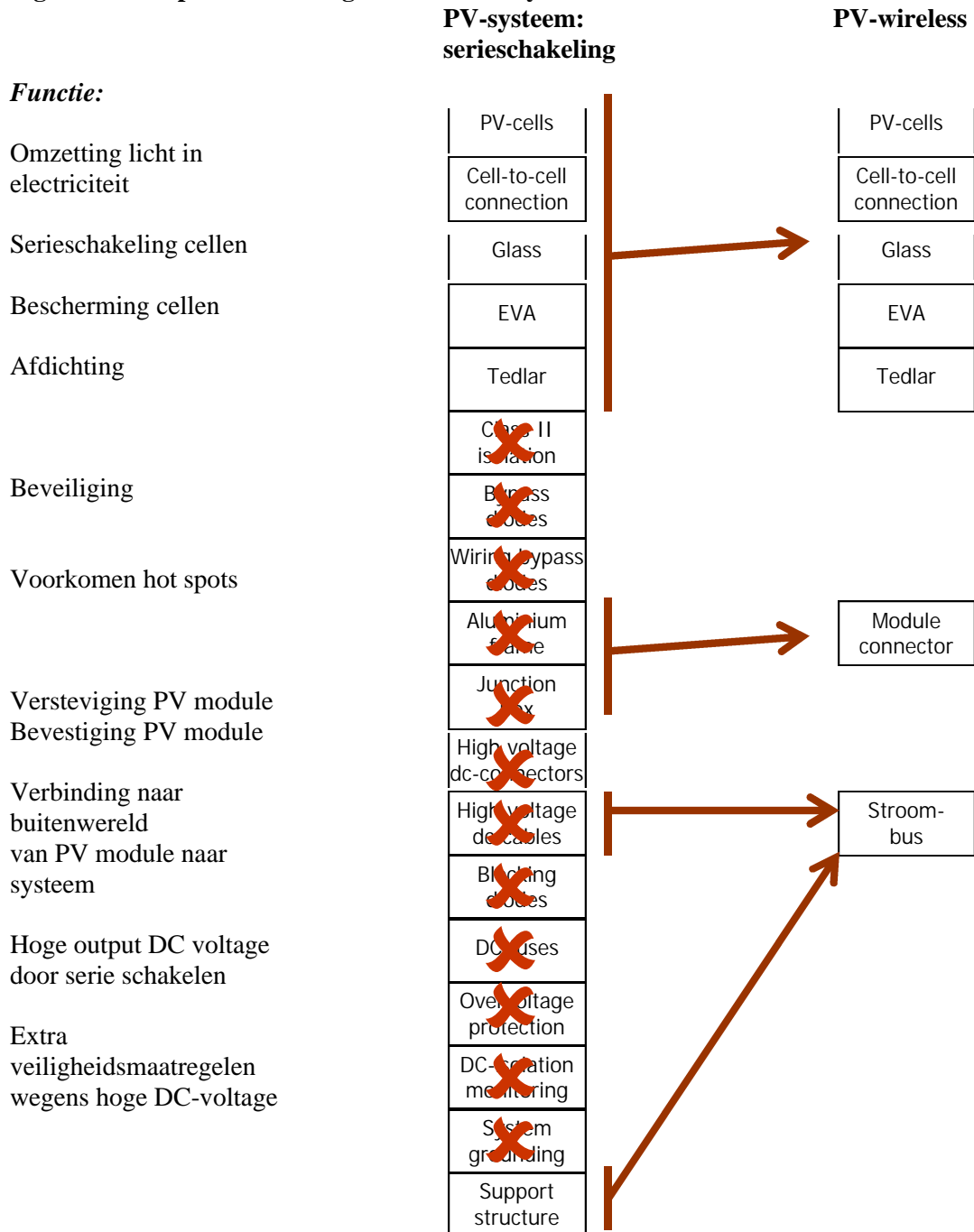
De **PV-wireless stroombus** – oftewel de stroomgeleidende PV-moduledrager – vervangt de dure high-voltage DC-bekabeling alsmede de draagconstructie. De grote doorsnede van 120 mm² aluminium maakt de stroombus sterk genoeg om de PV-modules te dragen en veilig de stroom te geleiden van enkele honderden ampères, zonder dat dit leidt tot hoge verliezen in de geleider.

De **PV-wireless moduleconnector** vervangt de junction box, het aluminium frame van de PV-module en de DC-connectoren. Per PV-module zijn vier moduleconnectoren nodig voor de mechanische stevigheid. Twee van deze zorgen ook voor de elektrische verbinding tussen PV-module en stroombus. Het gaat om een aluminium-aluminium verbinding, en om betrouwbaarheid van de verbinding te garanderen over een lange periode – 20 jaar – wordt gebruik gemaakt van een contactdruk van 100 N, 10 keer zoveel als normaal wordt toegepast voor een koperverbinding. De

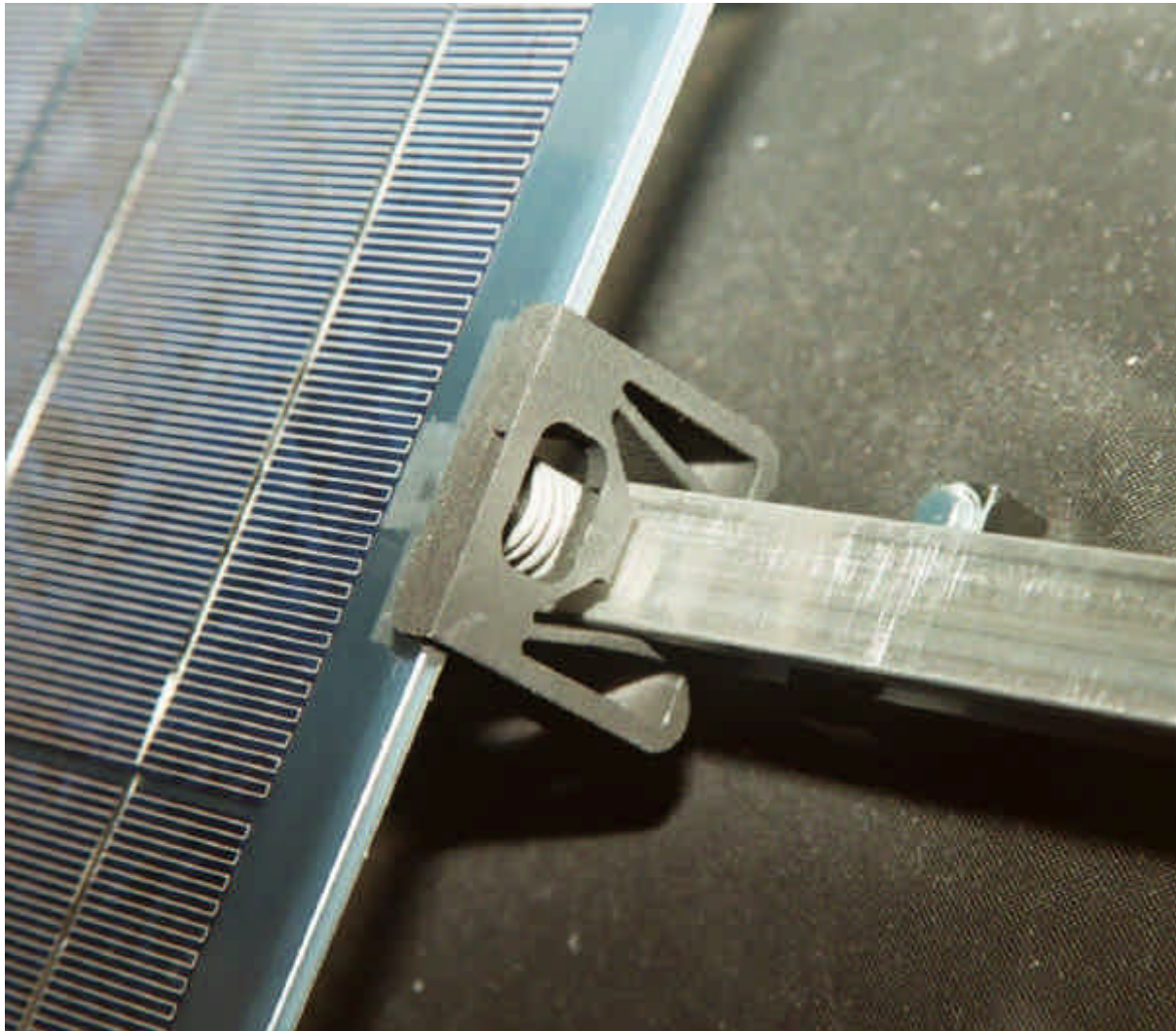
hoge druk zorgt voor een gasdichte verbinding, waarbij de dunne aluminiumoxide laag wordt samengeperst.

Om gebruik te kunnen maken van een vierpuntsverbinding in plaats van een aluminium frame rondom de PV-module, zonder dikker glas te moeten gebruiken, moeten de afmetingen van het PV-laminaat worden aangepast. Uit berekeningen is gebleken dat een 5 x 7 cellen PV-module optimaal is en voldoende sterk. Naast bedrading tussen de cellen zelf, is geen additionele interne bedrading meer nodig. Om kans op interne en externe kortsluiting te elimineren, zijn de elektrische verbindingen geplaatste onder de eerste en laatste cel van het PV-laminaat.

Figuur 1: Componenten seriegeschakeld PV-systeem en PV-wireless



Uit de haalbaarheidsstudie blijkt dat het PV-wireless concept inherent veilig is en energetisch aantrekkelijker dan huidige PV-systemen. Met name op het gebied van rendement en betrouwbaarheid wordt grote winst geboekt, terwijl mede een substantiële kostenreductie kan worden gerealiseerd. Een belangrijk aandachtspunt ligt echter bij vigerende PV-normen, waarin immers wel regels en normen zijn vastgelegd voor seriegeschakelde PV-systemen, doch niet voor parallel geschakelde PV-modules. Sterker nog, in de normen wordt ervan uitgegaan dat niet meer dan drie PV-modules parallel geschakeld mogen worden. Hoewel uit de studie tevens is gebleken dat norminstanties open staan voor het concept – en zelfs onderkennen dat aspecten als veiligheid niet in het geding zijn – is voor het welslagen van de introductie van PV-wireless essentieel dat de normen in deze worden aangepast. Tevens is het noodzakelijk dat de resultaten van de haalbaarheidsstudie wordt geverifieerd door het uitvoeren van testen aan prototypes, zowel van het concept als geheel, als van de separate componenten. Met name dient aandacht te worden besteed aan de moduleconnector, waaraan life cycle testen dienen te worden uitgevoerd.



Figuur 2. Foto van moduleconnector “geklikt” op de stroombus.

Elk PV-laminaat wordt uitgevoerd met vier moduleconnectoren, die fungeren als vervanging van het frame. Twee van deze connectoren zorgen ook voor de elektrische geleiding naar de aluminium stroombus, de vervanging van de DC-bedrading.

Inhoudsopgave

1. Achtergrond en doelstelling	7
1.1. Achtergrond.....	7
1.2. Doelstellingen haalbaarheidsstudie.....	9
1.3. Leeswijzer.....	9
2. Samenwerking met andere partijen	10
2.1. Wijze van samenwerking.....	10
2.2. Octrooi.....	10
2.4. Presentatie op PV-conferentie in Rome en DEN-subsidie-aanvraag.....	11
3. Werkzaamheden en resultaten	12
3.0. Inleiding.....	12
3.1. Raadplegen markt.....	13
3.1.1. <i>Vraag</i>	13
3.1.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	13
3.1.3. <i>Resultaten</i>	13
3.2. Verbinding PV-module en modulecontact.....	14
3.2.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	14
3.2.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	14
3.2.3. <i>Resultaten</i>	14
3.2.3.1. Afmetingen PV-module.....	14
3.2.3.2. Bevestiging modulecontact op PV-module.....	16
3.2.3.3. Vervanging functie junction box.....	17
3.2.3.4. Modulecontact.....	18
3.2.4. <i>Conclusies</i>	18
3.3. Verbinding modulecontact en stroombus.....	18
3.3.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	18
3.3.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	19
3.3.3. <i>Resultaten</i>	19
3.3.4. <i>Conclusies</i>	22
3.4. Stroombus: materiaal, bevestiging, scheiding +/- en positionering (horizontaal/verticaal). 22	
3.4.1. <i>Vraag</i>	22
3.4.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	22
3.4.3. <i>Resultaten</i>	23
3.4.3.1. Materiaal stroombus.....	23
3.4.3.2. Waterdicht onderdak.....	24
3.4.3.3. Scheiden van plus en min.....	24
3.4.3.4. Horizontaal of verticaal positioneren van stroombussen.....	25
3.4.3.5. 2xN stroombussen of N+1 stroombussen.....	25
3.4.4. <i>Conclusies</i>	26
3.5. Verbinding tussen stroombus en inverter.....	26
3.5.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	26
3.5.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	26
3.5.3. <i>Resultaten</i>	26
3.5.4. <i>Conclusies</i>	27
3.6. Omzetter.....	28
3.6.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	28
3.6.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	28
3.6.3. <i>Resultaten en conclusies</i>	28
3.7. Normen.....	29
3.7.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	29
3.7.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	29
3.7.3. <i>Resultaten</i>	29
3.7.4. <i>Conclusies</i>	30

3.8. Veiligheid.....	30
3.8.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	30
3.8.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	31
3.8.3. <i>Resultaten</i>	31
3.8.4. <i>Conclusies</i>	31
3.9. Elektrische en energetische aspecten: vergelijking serieschakeling met PV-wireless	32
3.9.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	32
3.9.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	32
3.9.3. <i>Resultaten</i>	32
3.9.3.1. Voor- en nadelen van serie- en parallelschakeling	32
3.9.3.2. Elektrische eigenschappen van serie- en parallelschakeling.....	33
3.9.3.3 Totale energieverliezen in elektrische geleiders van PV-string en PV-shunt	35
3.9.4. <i>Conclusies</i>	36
3.10. Systeemgrootte: vergelijking serieschakeling met PV-wireless.....	36
3.10.1. <i>Vraag</i>	36
3.10.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	36
3.10.3. <i>Resultaten</i>	37
3.10.4. <i>Conclusies</i>	37
3.11. Kosten: vergelijking serieschakeling met PV-wireless	37
3.11.1. <i>Aanleiding en vraag</i>	37
3.11.2. <i>Werkzaamheden, werkwijze</i>	37
3.11.3. <i>Resultaten</i>	37
4. Beoordeling van de resultaten	39
4.1. Beoordelingsaspecten.....	39
4.2. Resultaten.....	39
4.3. Conclusies en afsluiting	40
5. Presentatie op PV for Europe conferentie oktober 2002	41
5.1. Achtergrond.....	41
5.2. Presentatie in de stand.....	41
5.3. Paper.....	41
5.4. Informatievoorziening.....	42
5.4.1. <i>Flyer</i>	42
5.4.2. <i>Website</i>	42
5.5. Respons	42

1. Achtergrond en doelstelling

1.1. Achtergrond

De Nederlandse overheid streeft voor het jaar 2010 naar een bijdrage van duurzame energie in de energievoorziening van 10%. Voor de langere termijn zal deze bijdrage nog veel hoger liggen. Hoewel op de korte termijn de overheid vooral mikt op wind- en bio-energie, zal juist op de langere termijn – en met een relatieve toename van de bijdrage van duurzame energie – fotovoltaïsche (PV) energie steeds belangrijker worden. Een sterke daling van de (kost-)prijs van PV-systemen is daarom essentieel.

De prijs van PV-systemen bedraagt momenteel ca. € 6/Wp, waarvan ca. 60% voor rekening komt van de zonnepanelen zelf en 15% voor de inverter. Het resterende deel (25%) betreft de kosten van installatiematerialen (zoals kabels, connectoren), bevestigingsmaterialen, de menskosten van de installatie etc. Deze “overheadkosten” van PV-systemen worden over het algemeen aangeduid als BOS-kosten. Voor het jaar 2020 wordt verwacht – met name door een sterke daling van kosten van PV-cellen en PV-panelen – dat de bijdrage van de BOS-kosten aan PV-systemen zal zijn gestegen tot 40%, omdat geen daling van deze BOS-kosten wordt voorzien. PV-wireless beoogt een bijdrage te leveren aan de daling van de kosten van PV-systemen, en met name de BOS-kosten.

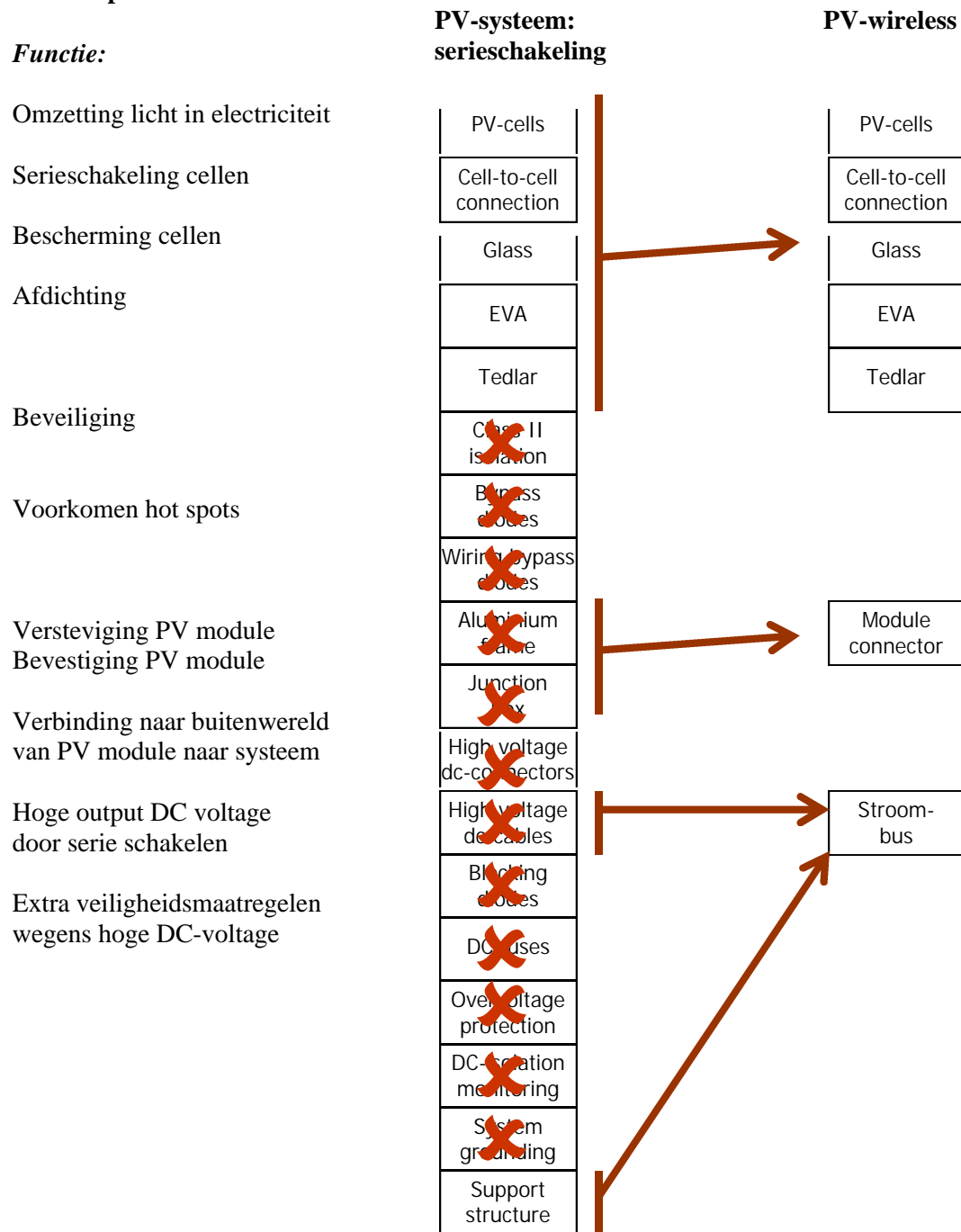
In huidige PV-systemen worden PV-modules in serie geschakeld, onder meer om een voldoende hoge spanning te verkrijgen voor omzetting met een hoog rendement van gelijkstroom (12 of 24 Volt DC) naar wisselstroom (230 AC). Mede door deze ontwerpkeuze zijn in de loop der jaren vele componenten aan PV-systemen toegevoegd om het goed en veilig functioneren van PV-systemen onder alle omstandigheden te garanderen. De basisgedachte achter het concept PV-wireless is om de functies die nu in een PV-systeem door verschillende componenten worden vervuld te integreren in nieuwe – goedkope - componenten, en tegelijkertijd PV-systemen inherent veilig te maken.

Verlaging van de BOS-kosten wordt daarom alleen haalbaar geacht door een PV-systeem “opnieuw te ontwerpen” met als uitgangspunten:

- Integreren van mechanische en elektrische functies
- Minimaliseren van het aantal componenten
- Ontwerpen voor eenvoudige installatie
- Vereenvoudigen van PV-systeem
- Minimaliseren van DC-spanningen

Deze geformuleerde uitgangspunten en doelstellingen kunnen echter alleen worden gerealiseerd indien ervoor wordt gekozen de PV-modules parallel te schakelen en niet meer in serie, zoals dat bij huidige PV-systemen wordt gedaan. In parallel geschakelde systemen blijft de spanning van het PV-systeem altijd beneden 21 Volt, een inherent veilige spanning, ook bij grote stromen. Een groot aantal componenten dat is toegevoegd om de veiligheid te garanderen juist vanwege de hoge spanningen van het PV-systeem worden daarmee overbodig.

De componenten van (het gelijkspanningsdeel van) een PV-systeem waarin de PV-modules in serie zijn geschakeld zijn weergegeven in Figuur 1.1. Tevens is aangegeven – door middel van een kruis - welke componenten worden geïntegreerd in nieuwe (goedkope) PV-wireless-componenten en welke componenten overbodig worden door toepassing van PV-wireless.

Figuur 1.1: Componenten PV-systeem met functies; beoogde integratie van componenten met het concept PV-wireless

PV-wireless is alleen mogelijk als de open spanning van het PV-systeem kleiner is dan 30 Volt. Immers de stroomgeleidende drager (stroombus) mag niet onder (hoge) spanning komen te staan, zodat deze niet meer veilig zou zijn om aan te raken. Dit betekent dat de PV-modules niet – zoals nu algemeen wordt gedaan – in serie worden geschakeld, maar parallel. Dit heeft consequenties voor de verschillende componenten, die in deze haalbaarheidsstudie zijn onderzocht. Daarnaast is in dit project ook nagegaan of het concept haalbaar is vanuit elektrisch, energetisch, veiligheids- en kostenopgave. Ook is gekeken naar de optimale systeemgrootte.

1.2. Doelstellingen haalbaarheidsstudie

PV-wireless beoogt een substantiële bijdrage te leveren aan het verlagen van de BOS-kosten van een PV-systeem door het integreren van functies, die in vigerende PV-systemen door verschillende componenten worden uitgevoerd, in één component, alsmede door het overbodig maken van componenten in vigerende PV-systemen.

Het doel van onderhavige haalbaarheidsstudie, waarvoor een subsidie werd verkregen vanuit het NEO-programma, was na te gaan of PV-wireless haalbaar is, waartoe antwoord wordt gegeven op de volgende vragen:

- Is de beoogde integratie van functies mogelijk? En zo ja, hoe dienen de nieuwe PV-wireless componenten uitgevoerd te worden?
- Is het met PV-wireless mogelijk een groot aantal componenten dat nu wordt toegepast in PV-systemen weg te laten?
- Is PV-wireless veilig en voldoet het concept aan vigerende normen?
- Is PV-wireless energetisch vergelijkbaar met vigerende PV-systemen?
- Leidt toepassing van PV-wireless inderdaad tot een substantiële kostenverlaging?

1.3. Leeswijzer

Voordat de resultaten worden gepresenteerd, wordt in hoofdstuk 2 eerst kort ingegaan op de samenwerking met andere bij het project betrokken partijen.

Voor deze haalbaarheidsstudie werd subsidie verkregen vanuit het Nieuw Energieonderzoek-programma, dat door de Nederlandse organisatie voor energie en milieu (Novem) wordt uitgevoerd. In voorliggend rapport wordt dan ook bij de presentatie van de resultaten in hoofdstuk 3 het format gebruikt dat door Novem voor projectrapportages in het kader van het Besluit subsidies energieprogramma's (BSE) wordt voorgeschreven (Model BSE 2002 C).

In de subsidie-aanvraag waren elf vragen geformuleerd, waarop in de haalbaarheidsstudie antwoord gegeven diende te worden. Voor elk van deze vragen wordt in hoofdstuk 3 beschreven:

- Aanleiding en vraag
- Werkwijze, werkzaamheden
- Resultaten
- Conclusies

In hoofdstuk 4 - beoordelingsaspecten - wordt getracht aan te geven in welke mate de haalbaarheidsstudie succesvol is geweest: voldoen de uitkomsten aan de in de subsidie-aanvraag geformuleerde verwachtingen, en is er dus reden voor vervolg.

Afsluitend wordt in hoofdstuk 5 kort ingegaan op de presentatie op de PV for Europe conferentie in Rome, 7-10 oktober 2002.

2. Samenwerking met andere partijen

2.1. Wijze van samenwerking

Op 26 april 2002 vond de *Workshop Innovatieve PV-integratietechnieken* plaats, waarop het concept PV-wireless aan diverse marktpartijen werd geïntroduceerd. Aanwezige marktpartijen waren: ECN, Oskomera, NKF Electronics, OKE, KEMA, TNO-Bouw en Van Dijk B.V. Tijdens deze bijeenkomst werd de intentie tot samenwerking uitgesproken.

Daarna hebben nog vier “plenaire” bijeenkomsten plaatsgevonden, namelijk op 31 mei 2002, 21 juni 2002 en op 19 juli 2002. Deze bijeenkomsten hadden meer het karakter van “werkbijeenkomsten”, waarop nieuwe oplossingen voor de verschillende componenten werden gepresenteerd en besproken, alsmede resultaten van actiepunten werden gepresenteerd.

Daarnaast was er sprake van intensieve tussentijdse email-correspondentie tussen partijen, met name over nieuwe oplossingsrichtingen voor de “moeilijke” componenten, die inbreng vereisten van alle betrokken partijen, met name het contact tussen stroombus en PV-module. De resultaten van het project, die hierna worden besproken, zijn dan ook de uitkomst van een iteratief proces, dat sinds juni tot het einde van het project heeft plaatsgevonden.

2.2. Octrooi

OKE-Services heeft zich van begin af aan op het standpunt gesteld voor de vinding *geen* octrooi aan te vragen om een brede toepassing van het concept en daarmee de implementatie van PV niets in de weg te leggen. Bij de andere betrokken partijen bestond echter angst dat andere partijen een octrooi op dit concept zouden aanvragen waardoor er belemmeringen voor betrokken marktpartijen zouden worden gecreëerd om het concept te gebruiken. Daarom is door ECN toch een octrooi aangevraagd met als uitvinder Oldenkamp. Hieraan zijn eisen verbonden om belemmeringen voor gebruik te voorkomen. Zo bedragen de kosten van eventuele licenties maximaal 1 Eurocent/Wp mag bedragen.



Figuur 2.1. Vertegenwoordigers van de deelnemende PV-wirefree partners in de stand op de PV for Europe conferentie, 7-10 oktober 2002, Rome

2.3. Presentatie op PV-conferentie in Rome en DEN-subsidie-aanvraag

Reeds in een vroeg stadium werd besloten tot een presentatie van het concept op de PV-conferentie *PV for Europe* te Rome, 7-10 oktober 2002, zowel in de vorm van een paper als in een stand. Deelnemende (betalende) partijen aan de stand zijn: ECN, NKF, Oskomera en OKE. Meer informatie over de presentatie en reacties van bezoekers is te vinden in Hoofdstuk 5 van dit rapport.

In augustus 2002 werd besloten tot een BSE-subsidie-aanvraag in het kader van het Novem-programma DEN-2002 voor het vervolgtraject, die eind augustus is ingediend onder de naam PV-wirefree. Het betreft een “proof-of-principle” project, waarin het verifiëren van de resultaten van de haalbaarheidsstudie en het testen van het concept als geheel, alsmede de separate componenten centraal staat. Beoordeling van deze aanvraag zal plaatsvinden op 29 oktober 2002. Start van het project is voorzien voor 1 januari 2003.

3. Werkzaamheden en resultaten

3.0. Inleiding

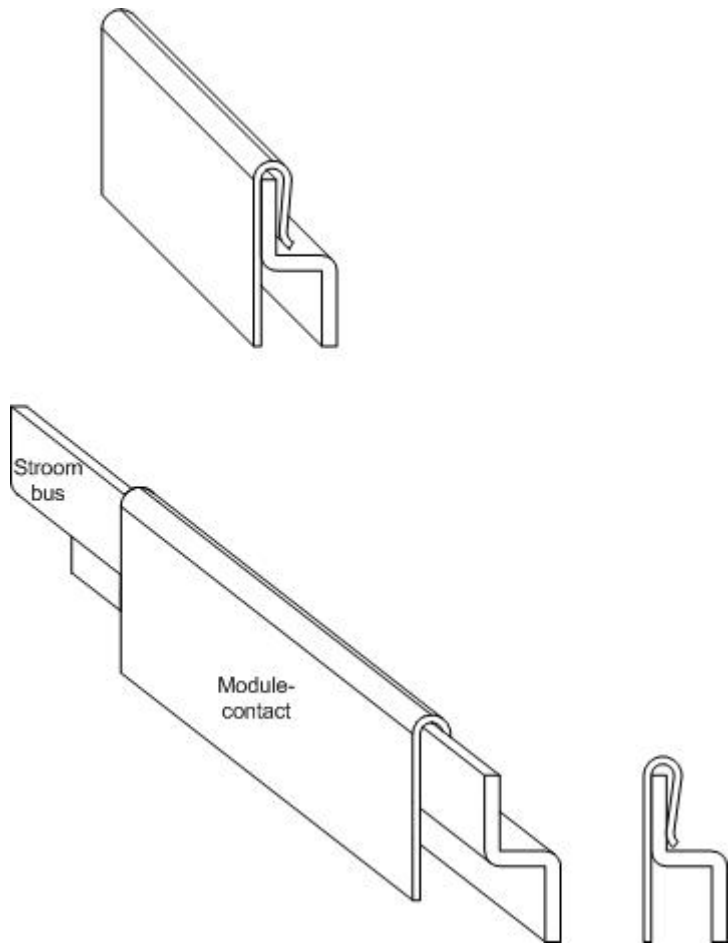
Met Figuur 1.1 in gedachten en gaande van de PV-module naar de inverter, zijn in de subsidie-aanvraag elf vragen geformuleerd om te kunnen nagaan of het concept PV-wireless levensvatbaar is. De resultaten, alsmede de geponeerde vragen en werkzaamheden, worden in dit hoofdstuk separaat behandeld.

PV-wireless kent, ten opzichte van vigerende PV-systemen twee belangrijke nieuwe componenten: de stroombus en het modulecontact. In Figuur 3.1 zijn deze nieuwe componenten – in hun meest eenvoudige vorm - weergegeven. Het basisprincipe van PV-wireless is om een drager te gebruiken voor het geleiden van de stroom, die tevens sterk genoeg is om ook de PV-modules aan te bevestigen: die drager is de stroombus. Het alternatief voor het huidige PV-module-frame is het modulecontact.

Gestart is met de PV-wireless component, die naar verwachting de meeste problemen zou opleveren, i.c. de minste vrijheidsgraden in oplossingsrichtingen zou hebben. Het betreft de verbinding tussen modulecontact en stroombus. Keuzes inzake deze component had consequenties voor oplossingsrichtingen van andere PV-wireless componenten, met name de vorm van de stroombus en het modulecontact. De ontwikkeling van deze drie componenten was derhalve een proces met een sterk iteratief karakter.

Achtereenvolgens worden in dit hoofdstuk behandeld.

1. Raadplegen markt
2. Verbinding PV-module en modulecontact
3. Verbinding modulecontact en stroombus
4. Materiaal stroombus
5. Verbinding stroombus en inverter
6. Omzetter
7. Normen
8. Veiligheid
9. Elektrische en energetische aspecten: vergelijking serieschakeling met PV-wireless
10. Systeemgrootte: vergelijking serieschakeling met PV-wireless
11. Kosten: vergelijking serieschakeling met PV-wireless



Figuur 3.1. Definitie stroombus en modulecontact

3.1. Raadplegen markt

3.1.1. Vraag

Met PV-wireless wordt beoogd een verlaging van de kosten van PV – en met name de BOS-kosten - te realiseren. Een deel van deze BOS-kosten wordt gevormd door de menskracht benodigd voor installatie en deze zal in de toekomst – relatief gezien - toenemen. Het is dus van belang de installatie zo eenvoudig mogelijk te houden, bijvoorbeeld door het vermijden van overbodige handelingen die de installateurs moeten verrichten op het dak.

Daarvoor moet eerst in kaart worden gebracht hoe PV-modules nu worden geïntegreerd in daken, alsmede “waar het nu misgaat”, c.q. op welke punten nu problemen worden ervaren. Het gaat dus vooral om wensen en eisen inzake de installatie, vanuit de praktijk. Daarom zijn met name installateurs en architecten geraadpleegd.

De voor dit onderdeel geformuleerde vraag was: Welke eisen en wensen hebben marktpartijen inzake PV-systemen? Wat zien zij als “ideaal” voor met name het installeren van de PV-modules in de gebouwde omgeving? Hoe zou naar hun mening het modulecontact het beste aangesloten en (eenvoudig) bevestigd kunnen worden op de stroombus?

3.1.2. Werkzaamheden, werkwijze

Om deze vraag te beantwoorden zijn eerst verkennende gesprekken gevoerd met partijen, die actief zijn in de PV-markt, en met name degenen die PV-systemen inpassen in de gebouwde omgeving: architecten (in hun ontwerp), degenen die PV-systemen installeren en bevestigen. Daarnaast zijn tijdens de werkbijeenkomsten – sinds de start van het project tot aan de presentatie in Rome hebben zeven bijeenkomsten plaatsgevonden - door betrokken partijen eisen en wensen ingebracht, onder andere bij het bespreken van concrete oplossingsrichtingen voor nieuwe PV-wireless componenten.

Tijdens deze besprekingen kwam mede naar voren dat er naast “algemene eisen en wensen vanuit de markt” in het PV-wireless concept tevens expliciet rekening gehouden moet worden met vigerende bouwnormen, alsmede arbo-wetgeving. Afgesproken is dat deze eisen ingebracht zouden worden door de “bouwkundige” partijen, met name ECN en TNO-Bouw. Dit onderdeel zal meegenomen dienen te worden in een eventueel vervolgtraject (zie paragraaf 2.4).

3.1.3. Resultaten

De eisen en wensen die tijdens de haalbaarheidsstudie naar voren zijn gekomen, zijn weergegeven in Tabel 3.1. Bij het maken van keuzes hebben deze impliciet dan wel expliciet als referentiekader gediend. ECN heeft toegezegd dit overzicht nader uit te bouwen, waarin bovendien onderlinge relaties zichtbaar zullen worden gemaakt.

Tabel 3.1. Belangrijkste eisen en wensen, die vanuit de markt (met name architecten en installateurs) worden gesteld aan een PV-module, c.q. een PV-systeem

<ul style="list-style-type: none"> • Esthetisch aantrekkelijk, bij voorkeur het aluminium frame rondom de PV-module minimaliseren, dan wel uitvoeren in een andere kleurstelling (niet blank aluminium).
<ul style="list-style-type: none"> • Eenvoud van installatie: zo min mogelijk (zware) gereedschappen benodigd voor het installeren op het dak, niet te zware PV-modules (door een man te dragen, bij voorkeur een gewicht minder dan 10 kg), zo min mogelijk handelingen uit te voeren op het dak zelf.
<ul style="list-style-type: none"> • Inzake de aansluiting van de PV-module wordt een voorkeur gegeven voor een kliksysteem, waarbij echter voor de installateur duidelijk moet zijn, dat de PV-module ook daadwerkelijk is “ingeklikt” (geluid van in klikken is onvoldoende). Een borging, of een ander visueel hulpmiddel dat dit duidelijk maakt, wordt gewaardeerd.
<ul style="list-style-type: none"> • Bouwmaten: de afmetingen van de PV-module dienen aan te sluiten bij vigerende bouwmaten (eenheden van 60 cm).

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Maak zoveel mogelijk gebruik van “standaard” materialen, i.c. materialen die in de bouwpraktijk normaal worden toegepast, en waarmee dus bouwers/installateurs ervaring hebben. Dit geldt ook voor de te gebruiken gereedschappen voor het installeren van de PV-modules. |
| <ul style="list-style-type: none">• Overwegingen voor reparatie: de PV-modules moeten bereikbaar blijven ook na installatie, voor reparatie. Ook indien de ontwerpers van mening zijn dat de PV-systemen een lange levensduur hebben (en de kans gering is dat reparatie nodig is) wordt dit toch gezien als stringente eis vanuit de markt. Bovenal dient het dak toegankelijk te zijn voor eventuele andere reparaties. |
| <ul style="list-style-type: none">• Minimaliseren materiaalgebruik |

3.2. Verbinding PV-module en modulecontact

3.2.1. Aanleiding en vraag

Het idee is om het nu algemeen toegepaste aluminium frame van PV-modules te vervangen door een “modulecontact”. Dit modulecontact moet de functie van het aluminiumframe overnemen (ondersteuning PV-module/cellen) en de junction box. Het moet daarom geschikt zijn goed contact te maken (electrische en mechanisch) met de stroombus (zie paragraaf 3.4).

De geformuleerde vraag die beantwoord dient te worden luidt derhalve: Wat is een optimale bevestiging van het modulecontact op de PV-module, zonder in te boeten op de functie van het huidige aluminium frame, namelijk ondersteuning van de PV-module, zodanig dat de PV-cellen niet worden beschadigd, en tegelijkertijd een zodanige vorm heeft dat het goed en eenvoudig kan worden verbonden met de stroombus (zowel mechanisch als electrisch)?

3.2.2. Werkzaamheden, werkwijze

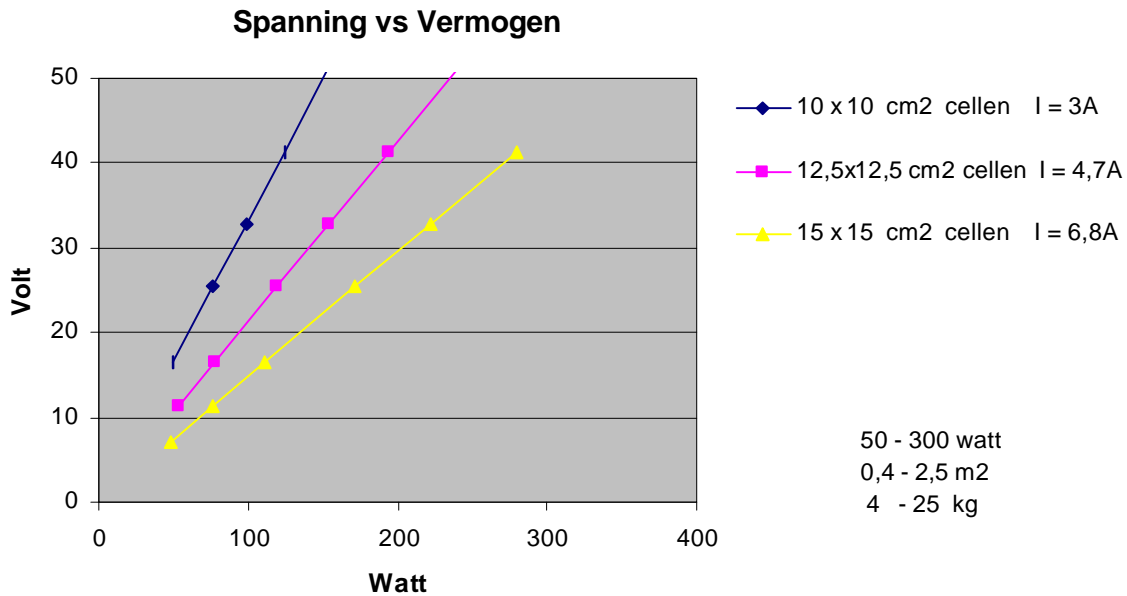
De werkzaamheden in deze fase zijn voor een groot deel uitgevoerd door ECN, met ondersteuning en informatieverstrekking door OKE. ECN heeft finite elements berekeningen uitgevoerd aan vierpuntsondersteuning van PV-modules in plaats van een frame. Ideeën voor ontwerp van het modulecontact zijn ingebracht door alle betrokken partijen.

Daarnaast is ook aandacht besteed aan de afmetingen en andere eigenschappen van de PV-modules, met name de afmetingen van de PV-modules, aangezien deze invloed heeft op de sterkte van de PV-module, en dus ook op het ontwerp van het modulecontact. Inbreng in deze heeft plaatsgevonden door alle betrokken partijen, met name ECN.

3.2.3. Resultaten

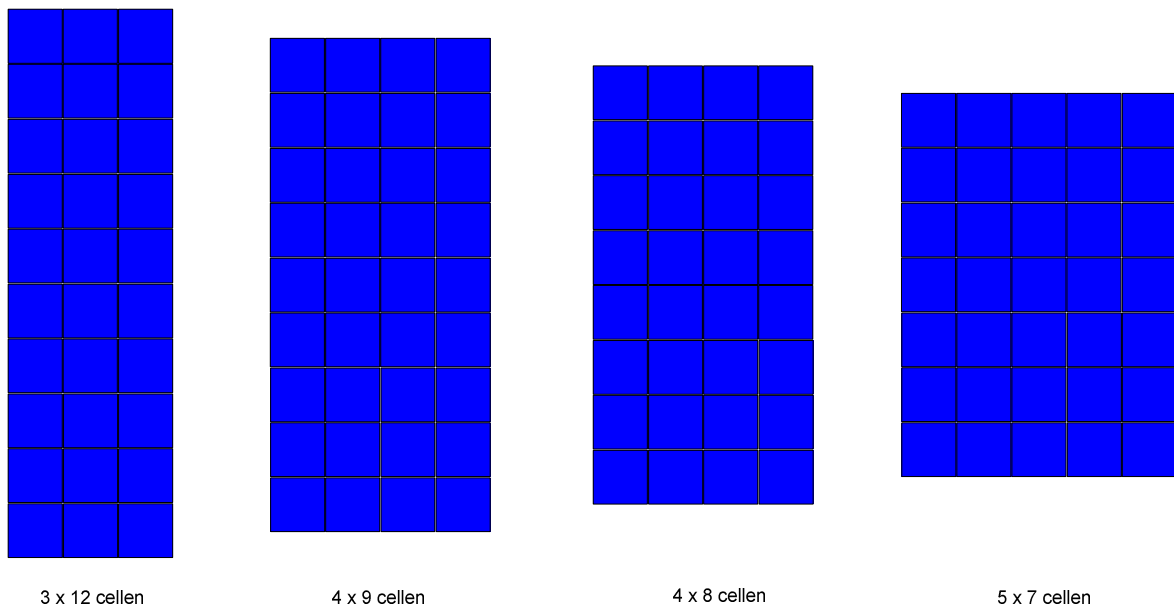
3.2.3.1. Afmetingen PV-module

Om een keuze te maken inzake de afmetingen van een PV-module hebben de electrotechnische eigenschappen als randvoorwaarden gediend. In Figuur 3.2.1 zijn modulegrootte, spanning en vermogen uitgezet. Verondersteld is dat ca. 50 Watt een gewicht van ca. 5 kg impliceert (11 kg/m²). Uitgaande van de eis dat een PV-module niet zwaarder mag wegen dan 18 kg, ligt de bovengrens op een modulevermogen van 200 Watt. Om te voldoen aan eisen inzake aanraakveiligheid dient de open spanning van de PV-module beneden 30 Volt te blijven. De ondergrens van de spanning ligt bij 10 Volt en dus bij PV-modules van 70-80 Watt uitgaande van het toepassen van grotere cellen (5”). Dit is als uitgangspunt gehanteerd voor een keuze inzake de afmetingen van de PV-module; de PV-modules blijven daarmee ook zeer hanteerbaar, zowel qua afmetingen als qua gewicht.



Figuur 3.2.1. Electrotechnische overwegingen bij keuze grootte PV-modules

Om een idee te krijgen van de verhouding (lengte x breedte) biedt figuur 3.2.2 houvast. In bestaande PV-modules worden meestal 9 x 4 cellen toegepast. Alternatieven zouden kunnen zijn: A4 of gulden snede; 4 x 8 cellen zou resulteren in een te lage spanning om accu's te laden. Voorkeuren – op esthetische gronden - liepen sterk uiteen. Belangrijker dan de (subjectieve) perceptie van wat als mooi wordt ervaren, is de standaard maatvoering in de bouw, zijnde 60 cm. Een PV-module met 4 x 9 cellen sluit daar het beste op aan. Echter, PV modules kunnen niet strak tegen elkaar bevestigd worden; er moet rekening worden gehouden met 1-2 cm tussenruimte, terwijl tevens rekening moet worden gehouden met een kruipweg (rand) van 20 mm. Andere overwegingen zijn flexibiliteit en maatsystemen.



Figuur 3.2.2. Mogelijke afmetingen PV-modules

De keuze voor de afmetingen van de PV-laminaten is uiteindelijk ingegeven door eisen inzake trekspanning (zie figuur 3.2.3). Om na te gaan of een 4-puntsverbinding mogelijk is die voldoet aan sterkte-eisen, zijn door ECN finite elements berekeningen uitgevoerd. Voor de windbelasting is gerekend met een kracht van 1500 N/m^2 . Voor de functionaliteit is uitgegaan van de IEC 1215, waar getest wordt op 2400 N/m^2 . Uit de berekeningen blijkt dat de spanningen die optreden in het glas bij 1500 en 2400 N/m^2 nog ruim onder de kritische waarden voor gehard glas blijven. Dynamische belastingen en de duurzaamheid van het geheel is niet gesimuleerd.

Tevens is een vergelijking gemaakt met een commercieel verkrijgbare PV-module (BP-diamond), waar een 6-puntsondersteuning wordt toegepast. Hieruit blijkt dat een 4-puntsondersteuning leidt tot lagere spanningen in het glas dan bij toepassing van een 6-puntsondersteuning. Echter, belangrijke voorwaarde daarbij is dat niet voor een 4×9 cellen laminaat wordt gekozen, maar voor 5×7 cellen in een laminaat. Bovendien dienen – om de spanning te minimaliseren – de vier punten van de 4-puntsverbinding een “vierkant” te vormen.

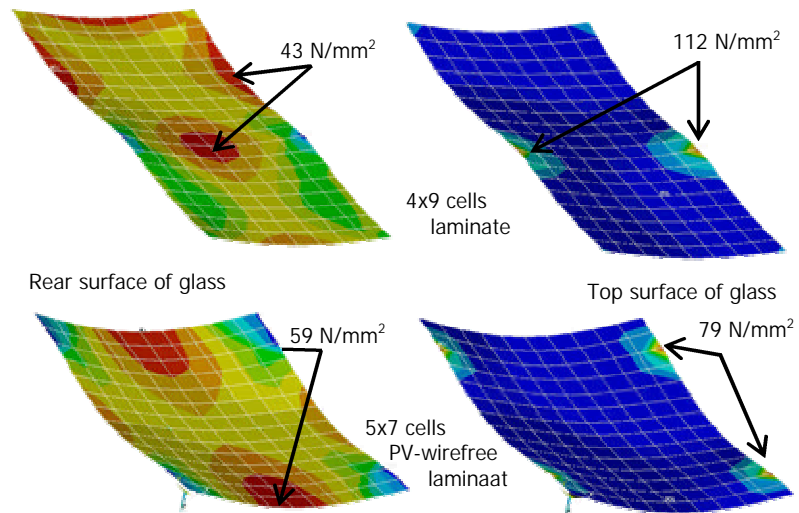
Overigens speelde bij deze keuze ook mee dat de voorkeur uitging naar een oneven aantal kolommen van cellen. Immers, hierdoor is het mogelijk de interne bedrading (serieschakeling van de cellen) van linksonder naar rechtsboven te laten verlopen. Interne lange additionele bedrading is dan niet meer nodig, en bovenal is kortsluiting uitgesloten.

Benadrukt wordt dat het voorgaande voor PV-fabrikanten geen drempels op zal werpen inzake de productie van PV-wireless laminaten. PV-fabrikanten worden geacht de afmetingen (aantal cellen per kolom en rij) eenvoudig aan te passen. Dit is ook bevestigd door diverse PV-fabrikanten tijdens de presentatie van het concept tijdens de PV-conferentie te Rome.

3.2.3.2. Bevestiging modulecontact op PV-module

Een belangrijk punt van zorg was niet zozeer het ontwerp van het modulecontact, doch vooral hoe het modulecontact op de PV-module kon worden bevestigd. De vraag die met name speelde was of verlijmen van de modulecontacten op de Tedlar laag mogelijk is. Hoewel diverse PV-fabrikanten van mening zijn dat dat uitgesloten is, waren betrokken experts in deze minder pessimistisch.

Uit verkennende lijmproeven is gebleken dat het verlijmen op het Tedlar mogelijk oplosbaar is. Het is echter onverantwoord op de EVA-laag, die de cellen bij elkaar houdt, krachten uit te oefenen. Hoewel geen inzicht bestaat in de grootte van de krachten die door verlijming aan het Tedlar op het EVA worden uitgeoefend is besloten deze oplossingsrichting niet verder te verkennen, zeker toen bleek dat in buitenlandse normen een lijmverbinding niet wordt gezien als een betrouwbare, veilige verbinding en dus altijd een additionele bevestiging nodig is. Alternatieve oplossingen – die aansluiten bij verlijming – zouden kunnen liggen in het meelamineren van een tussenlaag, waarop het



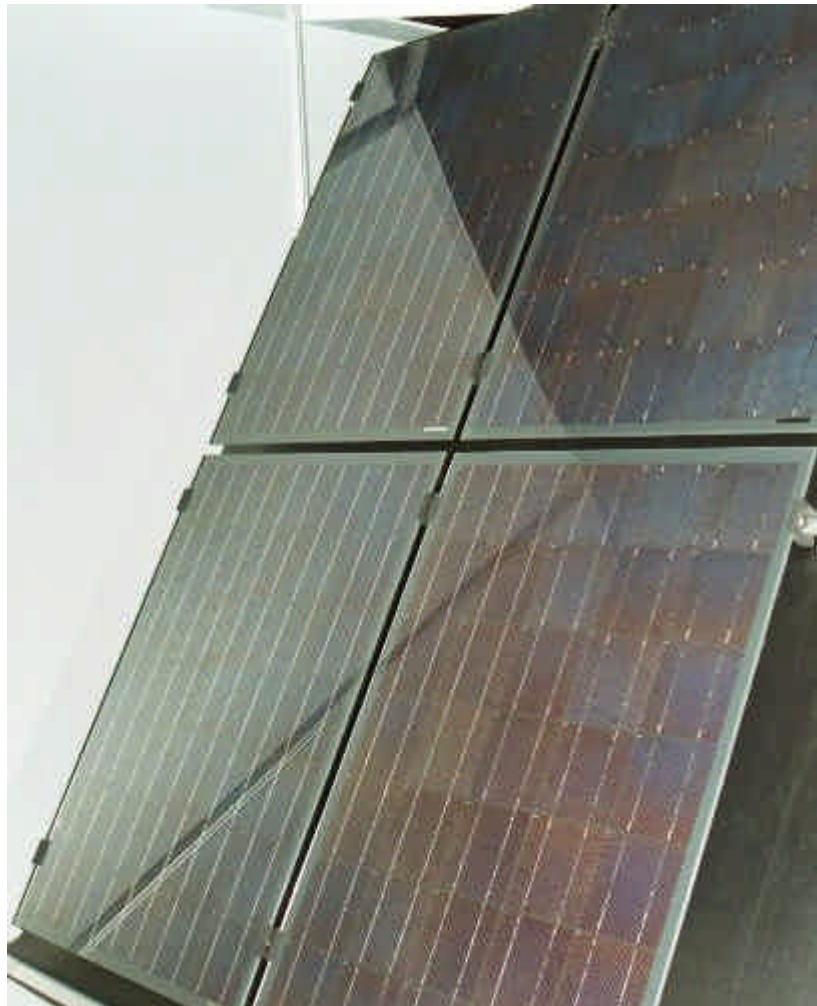
Figuur 3.2.3. Resultaten finite elements berekeningen.

Vergelijking van de trekspanning bij een druk van 2400 Pa van een commercieel verkrijgbare PV-module met 4×9 cellen en een 6-puntsverbinding en een 5×7 PV-laminaat met 4-puntsverbinding. De maximale trekspanning treedt op bij de verbindingpunten aan de bovenkant van het glas. De PV-module met een 6-puntsverbinding heeft een maximale trekspanning van 112 N/mm^2 , het laminaat met een 4-puntsverbinding maximaal of 79 N/mm^2 .

modulecontact (stevig) kan worden bevestigd. Deze oplossingsrichting is in het kader van onderhavig project verder uitgewerkt.

Overwogen is de profielen aan de randen te bevestigen. Belangrijk nadeel van een dergelijk oplossing is echter dat dan de + en – dicht tegen elkaar komen te liggen en dus additionele eisen moeten worden gesteld aan afstanden dan wel aan de isolatie. Dit zou eventueel opgelost kunnen worden door de PV-modules om-en-om te leggen (++ en --), doch dit impliceert dat de installateurs goed moeten worden geïnstrueerd, i.c. levert meer risico bij installatie op. Het heeft derhalve wel degelijk consequenties voor (de eenvoud van) het concept.

De verst uitgewerkte oplossing – zoals gepresenteerd op de PV-conferentie te Rome (zie figuur 3.2.3) – is gebaseerd op een 4-puntsbevestiging, die weliswaar verlijmd zijn aan de zonzijde, maar deze lijmverbinding is niet noodzakelijk voor de bevestiging, doch doet alleen dienst om de lagen van de PV-module bij elkaar te houden totdat het laminaat op de stroombus wordt gemonteerd.



Figuur 3.2.3. Vierpuntsverbinding van de PV-laminaten, zoals gepresenteerd op de conferentie PV for Europe, 7-10 oktober 2002, Rome. De vier moduleconnectoren vervangen het frame.

3.2.3.3. Vervanging functie junction box

Overwegingen die bij de locatie van de doorvoer van de contacten speelden (achterzijde, voorzijde, rand) van de PV-modules speelden waren:

- Bereikbaarheid bij installatie, montage, onderhoud
- Bescherming tegen weersinvloeden
- Productietechnieken (wegsnijden EVA/Tedlar)
- Integratie met profiel

Belangrijkste eis – en uitgangspunt – was echter hoe de functie van de junction box, namelijk het beperken van de weersinvloeden op het contact zelf, kan worden overgenomen. Op dat moment was reeds een besluit genomen inzake de verbinding tussen het modulecontact en de stroombus; gekozen was voor aluminium/kunststof folie (“flapjes”), die uit de PV-module komen. Om te allen tijde te voorkomen dat kortsluiting kan ontstaan kan het beste worden gekozen voor een plus-“draad” die aan de rechterbovenzijde naar buiten wordt geleid, en de min-“draad” aan de linkeronderzijde. Deze kunnen onder het aluminium gemonteerd worden.

Voortschrijdende – parallelle - ontwikkeling van de verbinding tussen modulecontact en stroombus resulteerde in een voorkeur voor het naar buiten treden van deze aluminium/kunststof folie aan de zijkant van de PV-module. In de praktijk bleek dit echter – vooralsnog – niet haalbaar. Als voorlopige oplossing is ervoor gekozen – net als bij standaard PV-modules - een snede te maken in de achterzijde van de Tedlar folie en hier een contactstrip doorheen voeren. De opening kan afgedicht worden door deze met een dunne kunsthars af te gieten, wat gebruikelijk is.

Benadrukt wordt dat het voorgaande voor PV-fabrikanten geen drempels op zal werpen inzake de productie van de PV-wireless-laminaten. PV-fabrikanten worden geacht in staat te zijn de interne bedrading betrekkelijk eenvoudig aan te kunnen passen. Door eisen te stellen aan de locatie waar deze interne naar buiten treedt wordt derhalve geen inbreuk gemaakt op het uitgangspunt een “open” systeem te ontwerpen. Essentieel is te onderkennen dat het voor PV-wireless uitgesloten is dat zowel de plus- als min-geleider in het midden van de PV-module naar buiten komen.

3.2.3.4. Modulecontact

Gezien de voorziene problemen inzake het verlijmen van het modulecontact aan de achterzijde van de PV-module is gekozen voor vier klemblokjes die op de PV-module (zonder frame) worden aangebracht. Twee daarvan fungeren tevens als het elektrisch, en zullen worden verbonden met de stroomdrager.

3.2.4. Conclusies

- De afmetingen van de PV-module zijn zo gekozen dat optimale elektrische eigenschappen worden verkregen, terwijl tevens wordt aangesloten bij eisen en wensen vanuit de markt inzake afmetingen (hanteerbaarheid) en gewicht.
- De verhouding van lengte en breedte van de PV-module is zo gekozen dat een maximale sterkte van de PV-module wordt verkregen en het PV-module frame overbodig wordt.
- Voor het tot stand brengen van het contact (vervangen van junction box) is gekozen voor een robuuste aluminium - kunststof folie, die aan de achterzijde van de PV-module door het Tedlar naar buiten komt. Deze zal worden verbonden met de stroombus via een elektrisch contact (zie onder 3.4).
- Uit door ECN uitgevoerde finite elements berekeningen blijkt dat het gekozen ontwerp de huidige mechanische functie van het aluminium frame overneemt zonder in te boeten op kwaliteit en stevigheid, dan wel levensduur.
- Echter, dit dient nog wel bewezen te worden door middel van praktijk- en levensduurtesten.

Nadrukkelijk zij vermeld dat oplossingen die een “frame” (metalen verbinding) impliceren die van + naar – lopen (dus van boven naar beneden in geval van “portrait” modules) uitgesloten zijn, omdat dit immers in het PV-wireless concept de kans op kortsluiting creëert: de dragers zijn immers tevens de stroomgeleiders.

3.3. Verbinding modulecontact en stroombus

3.3.1. Aanleiding en vraag

Het concept PV-wireless heeft geen junction box meer; deze wordt vervangen door een verbinding van het modulecontact met de stroombus. Deze verbinding zorgt echter niet alleen voor de geleiding van de stroom van PV-module naar geleidende drager – de vervanger van de DC-kabel – maar ook voor de mechanische ophanging van de PV-modules, en vervangt daarmee de dragende constructie voor het bevestigen van PV-modules

De geformuleerde vraag die in deze fase beantwoord diende te worden luidt derhalve: Wat is een optimale elektrische en mechanische verbinding tussen de PV-module, i.c. het modulecontact (zie paragraaf 3.2) en de stroombus?

3.3.2. Werkzaamheden, werkwijze

Het ontwerpen van elektrische contacten die gedurende de gehele levensduur “goed” contact blijven maken is een “vak apart”. Voor dit onderdeel heeft OKE dan ook beroep gedaan op de expertise van de heer P. van Dijk, specialist op dit gebied. OKE heeft wel grotendeels zelf de ontwerpen gemaakt van de contacten, die – op basis van voortschrijdend inzicht – in de loop van de tijd qua vorm en functionaliteit grote wijzigingen hebben ondergaan. De verwachte tijdsbesteding aan dit onderdeel door OKE is – met 40 uren – dan ook zwaar onderschat.

3.3.3. Resultaten

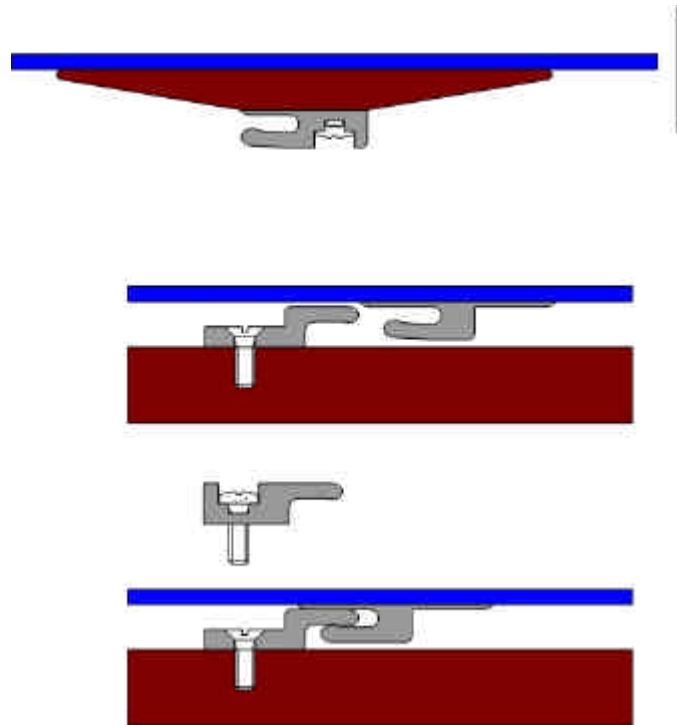
In figuur 3.3.1 is een eerste impressie weergegeven van de verbinding tussen modulecontact en stroombus: twee bus bars, een stroomdrager waarop de PV-modules kunnen worden vastgeklikt zodanig dat tegelijkertijd een elektrisch contact wordt gemaakt. Voor de stroomdrager werd uitgegaan van een aluminium extrusie, die gekleurd wordt geanodiseerd. Voor de anodisatie werd uitgegaan van 15 micron. Om contact tot stand te brengen met het modulecontact, zou lokaal de anodisatielaag verwijderd kunnen worden. Echter, om het contact in stand te houden is voldoende blijvende verwerking een vereiste.

De inbreng van Piet van Dijk leidde tot de volgende belangrijke inzichten en eisen, die gesteld moeten worden aan de (blijvende) elektrische verbinding tussen modulecontact en stroombus:

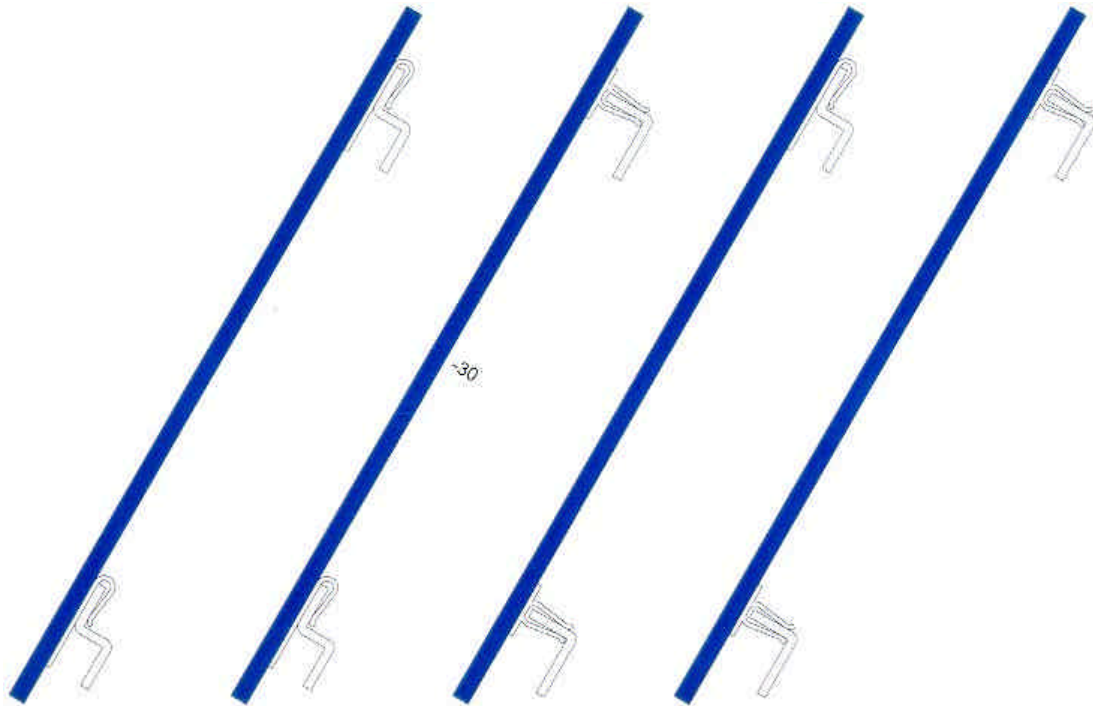
- De verbinding kan het beste tot stand worden gebracht door te schuiven onder grote normaalkracht, zodat een goede materiaalverbinding op microniveau tot stand wordt gebracht
- Daarna dient de verbinding te worden gefixeerd onder blijvende normaalkracht

Met andere woorden bij het plaatsen moeten de materialen voldoende in contact met elkaar worden gebracht (oppervlak) en er moet voldoende (blijvende) kracht worden gemaakt bijvoorbeeld door gebruik te maken van een veer. Deze twee elementen zijn zo essentieel, dat bepaalde opties, die deze waarborgen niet bieden, reeds bij voorbaat afvielen, zo ook het in Figuur 3.3.1 getoond concept, omdat hierin geen sprake is van waarborgen voor voldoende druk.

In Figuur 3.3.2 zijn vier opties voor de uitvoering van de verbinding tussen modulecontact en stroombus weergegeven, gebaseerd op Figuur 3.3.1, doch rekening houdend met de hiervoor geformuleerde belangrijke eisen. De rechter optie lijkt het meest voor de hand liggend: het modulecontact is een vork met veercontact. De stroombus wordt tussen de tanden van de vork geklikt. Op deze wijze is ook een groot contactvlak te realiseren. Echter, de tolerantie is beperkt. Indien er een afwijking is van meer dan 5 mm zullen de PV-modules niet in de drager kunnen worden geklikt. Als geen oplossing kan worden gevonden voor dit tolerantieprobleem, vervalt deze optie.

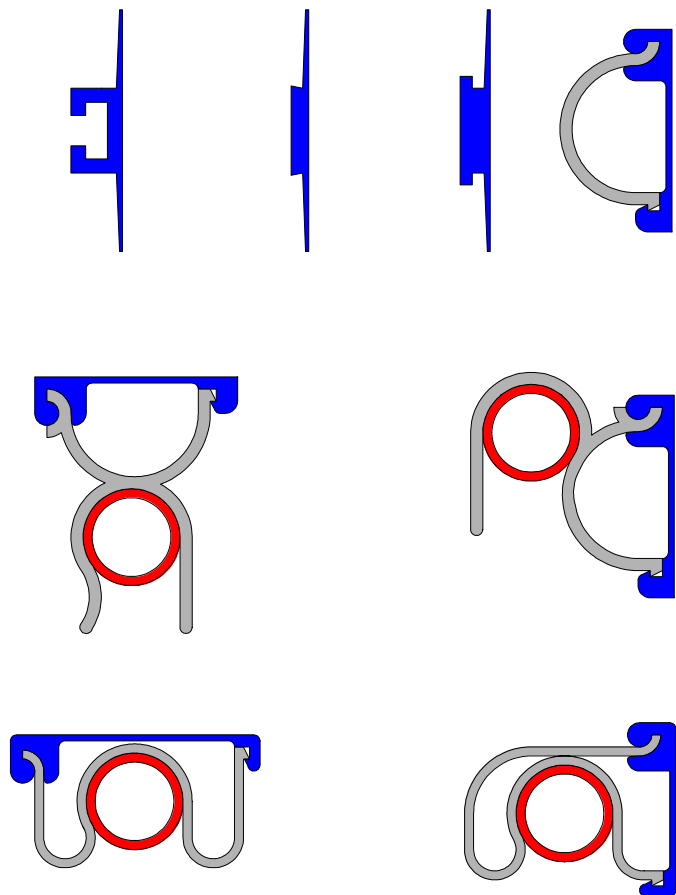


Figuur 3.3.1. Eerste verkennende impressie van verbinding tussen modulecontact en stroombus



Figuur 3.3.2. Mogelijke uitvoeringen van verbinding tussen stroombus en modulecontact

In optie 2 (tweede van rechts) is voor de onderste verbinding tussen modulecontact en stroombus nog steeds gekozen voor een vorkverbinding, maar voor de bovenste verbinding wordt gebruik gemaakt van een hangstelsel: het modulecontact wordt in de stroombus gehangen. Dit voorkomt het tolerantieprobleem van optie 1, doch wanneer de PV-module bij het “inhangen” te hoog wordt opgetild kan de contactveer kapot gaan, en ook bij verwijderen kunnen beschadigingen optreden. In optie 3 (tweede van links) is de vork- en hangverbinding van optie 2 omgedraaid. Dit voorkomt de problemen van optie 2, doch nu wordt het moeilijk meerdere PV-modules boven elkaar te installeren. In optie 4 (geheel links) wordt de PV-module via het modulecontact in de stroombus gehangen en vervolgens ingeschoven. Deze optie is gekozen als vertrekpunt voor de verdere ontwerp van deze PV-wireless component. Essentieel is de steekbeweging, waarbij de zwaartekracht meewerkt. Na een nadere verkenning van de in Figuur 3.3.2 weergegeven uitvoering ontstond het inzicht dat mogelijk beter kon worden gekozen voor een “ronde” stroombus.



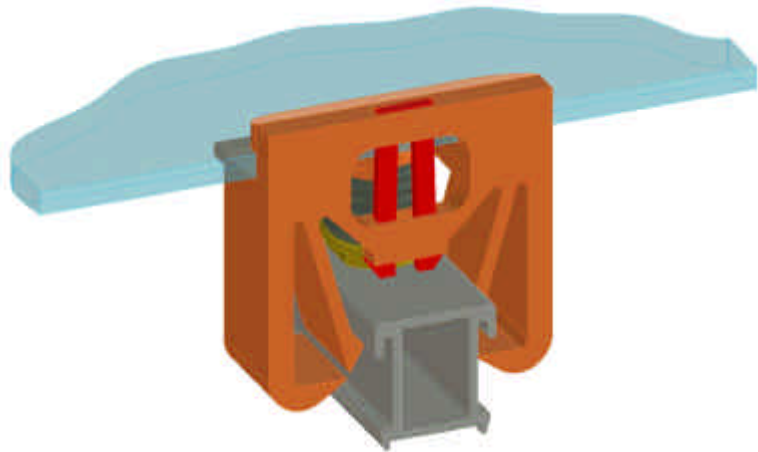
Figuur 3.3.3. Aanzet voor verbinding tussen ronde stroombus en modulecontact

Niet alleen vergroot deze vorm de stevigheid – benodigd voor de draagfunctie – maar biedt ook voordelen wegen de symmetrische vorm. Een uitwerking hiervan is weergegeven in Figuur 3.3.3.

In deze eerste verkennende ontwerpen was voorzien dat over de hele lengte (lijnverbinding) van de stroombus contact zou worden gemaakt met het modulecontact, zodat sprake zou zijn van grote redundantie, en dus een enorme toename van de betrouwbaarheid. Echter, uit de studie is gebleken dat dit te hoog gegrepen is, omdat in dat geval het contact “natuurlijk beweegt” door verschillende uitzettingscoëfficiënten van materialen. Niet alleen moet daarbij rekening worden gehouden in de verschillen in uitzetting tussen de PV-module en het aluminium van de stroombus, maar ook met het feit dat de uitzetting van aluminium groter is dan van hout. De stroombus moet derhalve zo worden bevestigd dat deze (enigszins) kan schuiven. Indien dus op meerdere plaatsen contacten worden aangebracht zou dit leiden tot inferieure contacten, die na verloop van tijd niet meer elektrisch contact zouden maken. Daarom is van het idee om op meerdere plaatsen per PV-module elektrische contacten aan te brengen afgezien, en is gekozen voor een zogenaamde puntverbinding. Per PV-laminaat zullen slechts twee elektrische contacten worden aangebracht. Echter, om voldoende mechanische ondersteuning te bieden (dubbele functie van de stroombus), zullen twee extra verbindingen nodig, die echter geen elektrische functie vervullen. Na het ontstaan van dit inzicht is een groot aantal ontwerpen gepasseerd, die steeds weer aanleiding gaven tot nieuwe inzichten.

Het definitieve ontwerp is weergegeven in Figuur 3.3.4. Het wordt gekenmerkt door een klikverbinding naar de stroombus. Met andere woorden, het modulecontact – vier per PV-module – kan eenvoudig op de stroombus worden geklikt.

De vraag is of de verbinding extra geborgd moet worden door deze bijvoorbeeld met een schroef vast te zetten. Enerzijds moeten zoveel mogelijk “extra” handelingen op het dak vermeden worden. Anderzijds werd door marktpartijen op borging aangedrongen. Gedacht zou kunnen worden om in de aluminium extrusie (stroombus) een borgingsmogelijkheid – een ribbeltje of uitsparing - in te bouwen, waar overheen een kapje kan worden geklikt, waardoor de verbinding wordt geborgd. Overigens betekent dit niet dat de borging ten alle tijde moet worden gebruikt, maar alleen wanneer dit nodig is.



Figuur 3.3.4. Definitief ontwerp van het modulecontact, dat wordt gekenmerkt door een simpele klikverbinding

Gekozen is voor een aluminium-aluminium elektrische verbinding. De reden hiervan is dat voor de stroombus aluminium als voorkeursmateriaal naar voren is gekozen. Uitgaande van aluminium voor de stroombus komt voor het elektrisch contact alleen nog aluminium in aanmerking. Immers, aluminium is een zeer onedel metaal en maakt alleen goed contact met het “eigen” materiaal. Onderkend wordt echter dat nader onderzoek nodig is, met name of deze keuze in de praktijk ook haalbaar zal zijn. Eerder verricht onderzoek (Verenigde Staten) duidt op mogelijke problemen, echter aluminium-aluminium verbindingen worden in de vliegtuigindustrie veel toegepast, en zijn dus mogelijk. Uit de studie is gebleken dat voor een betrouwbare aluminium-aluminium verbinding een zeer goed gedefinieerde contactdruk nodig is van ca. 100 N, ca. 10 keer groter dan gebruikelijk. De uitdaging van het vervolgtraject is vooral een betaalbaar alternatief te ontwikkelen, dat voldoet aan de hiervoor geformuleerde mechanische en elektrische eisen.

3.3.4. Conclusies

- Deze fase heeft geresulteerd in een eerste ontwerp (tekening) van het elektrisch en mechanisch contact tussen PV-module en stroombus.
- Per PV-module zullen twee elektrische contacten, zoals weergegeven in figuur 3.3.4, worden aangebracht. Om voldoende mechanische ondersteuning te waarborgen (dubbele functie van de stroombus), zullen twee extra verbindingen worden aangebracht, die echter geen elektrische functie vervullen.
- Als materiaal voor de stroombus is gekozen voor aluminium (zie onder 3.2). Om een betrouwbaar elektrisch contact te garanderen moet daarom gekozen worden voor een aluminium-aluminium elektrische verbinding, omdat alleen identieke metalen goed met elkaar een contact vormen.
- Voor een betrouwbare aluminium-aluminium verbinding is een zeer goed gedefinieerde contactdruk nodig van ca. 100 N, ca. 10 keer groter dan gebruikelijk. De uitdaging van het vervolgtraject is vooral een betaalbaar alternatief te ontwikkelen, die voldoet aan de hiervoor geformuleerde mechanische en elektrische eisen.

Eisen waaraan de mechanische verbinding dient te voldoen zijn:

- Betrouwbaarheid
- Snel en eenvoudig te installeren
- Liever klikken dan schroeven
- Spanningsvoerende componenten aan zonzijde van de PV-module dienen te zijn geïsoleerd (coating of anodisatie lijkt ook bespreekbaar)
- Optimaal materiaal gebruik, vooral aluminium, maar ook alle andere materialen
- Goedkoop

Eisen waaraan de elektrische verbinding dient te voldoen zijn:

- De contactoppervlakken mogen na plaatsing niet meer ten opzichte van elkaar bewegen
- Aandrukkraft moet gegarandeerd zijn voor minimaal 20 jaar (liever meer), te weten ca. 100 N, ca. 10 keer groter dan gebruikelijk
- Foutloos contact moet gegarandeerd zijn
- Gezien de keuze van aluminium voor de stroombus, komt alleen een aluminium-aluminium verbinding in aanmerking.

3.4. Stroombus: materiaal, bevestiging, scheiding +/- en positionering (horizontaal/verticaal)

3.4.1. Vraag

Als vraag voor dit onderdeel van de studie was geformuleerd: Welk materiaal dient te worden gekozen voor de stroombus (de stroomgeleidende drager) als vervanger van de DC-kabel (en connectoren), waarbij een afweging dient te worden gemaakt tussen dikte van de strip, zodat deze voldoende dragend kan zijn, het stroomvoerende vermogen, eigenschappen inzake contact maken met andere materialen (koper) en uiteraard kosten, maar ook de energetische terugverdientijd.

Daarnaast bleek tijdens het project de wijze van bevestiging van de stroombus op het dak een punt van aandacht, terwijl mede de perceptie op de positionering – horizontaal dan wel verticaal – een punt van discussie bleek, alsmede de scheiding van +/- en tenslotte ook de keuze tussen 2N en N+1 stroombussen. Deze punten worden in deze paragraaf mede behandeld.

3.4.2. Werkzaamheden, werkwijze

De werkzaamheden voor dit onderdeel zijn volledig uitgevoerd door OKE. Het betreft het bestuderen van van toepassing zijnde bronnen. Ook zijn experts geraadpleegd (aluminiumcentrum,

extrusiebedrijven). Vervolgens zijn berekeningen uitgevoerd: stroomdragende en energetische eigenschappen, draagkracht, etc..

Inzake de wijze van bevestigen van de stroombus op het dak is gebruik gemaakt van met name de input van Oskomera. Oplossingsrichtingen voor de positionering – mede in het licht van het voortschrijdend inzicht met betrekking tot de verbinding tussen modulecontact en stroombus – zijn met name ingebracht door OKE-Services.

3.4.3. Resultaten

3.4.3.1 Materiaal stroombus

Voor het materiaal van de stroombus bestonden drie kandidaten: aluminium, staal en koper: In tabel 3.2 zijn de eigenschappen van deze materialen vermeld. Echter, belangrijker dan het vergelijken van de materialen op zich, is te kijken naar wat benodigd is voor de stroomgeleidende drager in het PV-wireless concept. Deze vergelijking is weergegeven in Tabel 3.3 voor een drager met 1 mOhm/m weerstand.

Tabel 3.2. Enkele eigenschappen aluminium, staal en koper

	Aluminium	Staal	Koper
Kosten - bulk (december 2001) - sheet - geextrudeerd - geanodiseerd	€ 1,50/kg € 4,14/kg € 3,00/kg +10%	€ 0,81/kg	€ 1,64 /kg € 5,0/kg
Soortelijke weerstand	0,030 μ Ohm/m	0,1 μ Ohm/m	0,017 μ Ohm/m
Soortelijk gewicht	2700 kg/m ³	7857 kg/m ³	8900 kg/m ³
Energie-inhoud Volgens ECN - gerecycled Volgens SAPA - gerecycled (SAPA)	55-69 kWh/kg 8 kWh/kg 37,2 kWh/kg 4 kWh/kg	8-14 kWh/kg + 3,7-8 kWh/kg (finishing) 9,5 kWh/kg	> 28 kWh/kg 1,4 kWh/kg

Ter vergelijking een overzicht van kosten van andere stroomdragers (grote aantallen):

- 60 mm² geextrudeerd en geanodiseerd aluminium: €0,53/m (0,5 Ohm/km)
- 35 mm² welding cable: € 1,55/m (0,5 Ohm/km)
- High voltage DC cable: € 0,38/m (7 Ohm/km)
- High voltage DC cable 4 mm², dat normaal in een PV-systeem wordt toegepast: € 0,5/m (4,4 Ohm/km)

Tabel 3.2. Specificaties drager met een 1 mOhm/m weerstand

	Aluminium	Staal	Koper
Doorsnede	A = 30 mm ²	A = 100 mm ²	A = 17 mm ²
Gewicht	m = 0,081 kg/m	m = 0,786 kg/m	m = 0,151 kg/m
Kosten: - gebaseerd op plaat - gebaseerd op bulk - extrusie	€ 0,33/m € 0,12/m € 0,24/m	€ 0,64/m	€ 0,76/m € 0,25/m
Energie-inhoud - gerecycled	3-5,6 kWh/m 0,3-0,6 kWh/m	6,3-11 kWh/m	4,2 kWh/m 0,2 kWh/m

Mede op basis van de eisen vanuit de markt (zie paragraaf 3.1) bestond er bij deelnemende partijen een duidelijke voorkeur voor aluminium. Niet alleen omdat het een “normaal” en geaccepteerd bouw materiaal is, maar ook omdat het qua gewicht niet te zwaar is. Bovenal is aluminium relatief

goedkoop (i.c. per eenheid geleiding) en is het maken van (ingewikkelde) extrusies evenmin duur, dan wel bewerkelijk..

De vraag was of deze keuze verdedigbaar zou zijn in termen van energierugverdiëntijd. Als eis werd gesteld dat de benodigde energie voor de productie van de drager niet meer mag bedragen dan 20% van de output van 1 PV module gedurende een jaar, wat overeenkomt met een energieverlies van 1% over de totale levensduur van een PV-module (20 jaar). Het antwoord op deze vraag is voor aluminium als volgt berekend:

- Voor een 80 Watts PV module impliceert dit: $E = 0,2 \times 0,8 \times 80 \text{ Wp} \times 1000 \text{ h} = 12,8 \text{ kWh}$.
- Voor het produceren van 1 kg Aluminium is 37,2 kWh nodig, voor een PV-module mag derhalve slechts $12,8 / 37,2 = 0,344 \text{ kg}$ Aluminium worden gebruikt om te voldoen aan de gestelde doelstelling.
- Stel dat er gebruik gemaakt wordt van twee dragers van 0,6 meter en twee dragers van 0,4 meter; dan betekent dit, dat per PV-module 2 meter geëxtrudeerd aluminium nodig is.
- Het cross area per PV module wordt daarmee $A = 0,44 \text{ kg} / 2700 \text{ kg/m}^3 / 2 \text{ m} = 63,7 \text{ mm}^2$.

Op basis van deze berekening, alsmede berekeningen inzake energieverliezen (zie paragraaf 3.9) is een doorsnede van 60 mm^2 van de stroombus optimaal voor de elektrische geleiding. Echter, de stroombus dient ook mechanisch voldoende sterk te zijn om de PV-modules te kunnen dragen. Berekeningen inzake sterkte en stijfheid laten zien dat – uitgaande van twee steunpunten per PV-module met een onderlinge afstand van 0,35 m - een doorsnede van 120 mm^2 vereist is. Deze doorsnede is dan ook gekozen in het “definitieve” ontwerp van de stroombus.

3.4.3.2 Waterdicht onderdak

Een punt van aandacht bleek hoe voorkomen dient te worden dat water op het onderdak terecht komt. Met andere woorden welke maatregelen moeten worden genomen om het water weg te leiden, bijvoorbeeld door gootjes, om aldus ervoor te zorgen dat het dak ook waterkerend blijft. Daarbij speelt de vraag of wel verondersteld mag worden dat een waterdicht dak wordt toegepast gezien de problemen die toepassing van waterdichte daken met zich meebrengen, namelijk inwendige condensatie. OKE meent dat dit probleem en deze vraagstelling in het kader van onderhavig project niet beantwoord behoeven te worden; dit aspect staat immers los van het concept PV-wireless; het is meer een “algemeen PV-probleem”.

3.4.3.3 Scheiden van plus en min

OKE is bij het ontwikkelen van het concept er steeds vanuit gegaan per PV-module-bank gebruik te maken van twee moduledragers: een voor de plus en een voor de min. Hiermee werd een volledige scheiding aangebracht tussen plus en min, waarmee de kans op kortsluiting wordt geminimaliseerd. Deze benadering – en de uitgangspunten - is reeds besproken in paragraaf 3.4 (zie figuur 3.4.2)

Een alternatieve benadering – die werd aangedragen door ECN - is de combi-rail, waarin positieve en negatieve spanningsdrager zijn geïntegreerd (zie figuur 3.2.2). Het idee is dat de stijfheid van de ene geleider wordt gebruikt voor de andere, waardoor niet alleen materiaal wordt bespaard, maar ook het risico van beschadiging afneemt. Het verschil in uitzettingscoëfficiënt (zie paragraaf 3.4) speelt minder een rol, terwijl eenvoudig korte en lange modules gecombineerd kunnen worden. Weliswaar is voor de bevestiging van de PV-module een tweede rail nodig, maar deze zou bijvoorbeeld van kunststof kunnen zijn. Bovendien kan die dan op de uiteinden van de PV-module worden geplaatst. Naast deze voordelen biedt deze benadering echter ook belangrijke nadelen: isolatie en een vergrote kans op kortsluiting, waardoor additionele beveiligingsmaatregelen moeten worden ingebouwd (extra kosten).

OKE is van mening dat een optimale situatie wordt bereikt indien beide geleiders van elkaar zijn gescheiden en ongeveer een zelfde doorsnede hebben. Vandaar dat gekozen is voor het oorspronkelijke concept: scheiding van plus en min door het gebruik van twee separate stroomdragers, die “ver” van elkaar worden gemonteerd op de PV-module (eigenlijk andersom). Voor de afstand tussen de geleiders, kan worden gekozen voor de ideale mechanische maat, namelijk ongeveer 1/8 van boven en 1/8 van onderen (van de PV-modulerand).

3.4.3.4 Horizontaal of verticaal positioneren van stroombussen

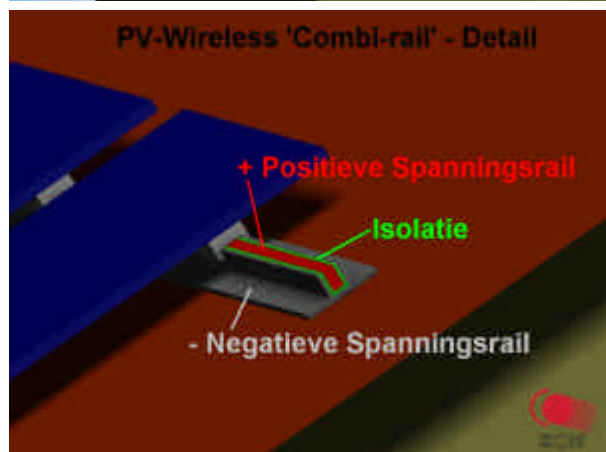
Bouwkundigen en architecten blijken verschillende voorkeuren inzake de positionering - horizontaal of verticaal - van de stroombus te hebben. Voor de presentatie van het concept op de PV-conferentie in Rome is gekozen voor horizontale dragers en verticale panelen (portrait). Dit heeft ook de voorkeur van OKE, aangezien deze oplossing leidt tot het meeste aantal PV-modules per stroombus (minimaliseren materiaalgebruik) en het concept dan ook geschikt is om op platte daken toe te passen. Leidend het maken van de keuze in deze dient te zijn dat de installatie zo eenvoudig mogelijk is.

3.4.3.5 2xN stroombussen of N+1 stroombussen

Een belangrijk punt van discussie bleek de keuze tussen 2xN stroombussen (dus twee horizontale stroombussen per PV-modulebank) of N+1 stroombussen, waarin N het aantal PV-modulebanken. 2xN stroombussen betekent dus twee horizontale stroombussen per PV-modulebank. Bij een N+1 systeem maken twee boven elkaar gesitueerde PV-modulebanken gebruik van of dezelfde plus-stroombus of dezelfde min-stroombus, waardoor dus N-1 stroombussen kunnen worden bespaard. De voor en nadelen van deze twee benaderingen zijn opgenomen in Tabel 3.2.3.

Tabel 3.4.3 Eigenschappen van 2xN en N+1 systemen

2 x N stroombussen	N+1 stroombussen
<ul style="list-style-type: none"> • Elke rij/kolom is onafhankelijk, alle krachten blijven binnen 1 rij/kolom 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle rijen/kolommen staan met elkaar in verbinding en oefenen derhalve krachten op elkaar uit
<ul style="list-style-type: none"> • Overzichtelijke systeem lay-out (plus van alle panelen onder/links, min van alle panelen boven/rechts) 	<ul style="list-style-type: none"> • Minder overzichtelijke systeem lay-out (per rij/kolom wisselt de polariteit van het paneel)
<ul style="list-style-type: none"> • 1 inverter per rij/kolom 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 inverter per twee rijen/kolommen
<ul style="list-style-type: none"> • Meer montagetijd voor de bussen nodig dan bij N+1 stroombussysteem 	<ul style="list-style-type: none"> • Snellere montage van de bussen dan by 2xN systemen
<ul style="list-style-type: none"> • Geen extra maatregelen nodig voor isolatie stroombussen, deze zitten achter module en zijn na installatie niet aanraakbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Extra maatregelen nodig om stroombus aan voorzijde te isoleren



Figuur 3.2.2. Concept combi-rail

Hoewel het N+1-systeem enkele belangrijke voordelen heeft, geniet een 2xN systeem toch de voorkeur met als belangrijkste argument dat PV-wireless vooral simpel en eenvoudig dient te zijn. N+1 impliceert niet alleen dat extra maatregelen moeten worden genomen om de stroombus te isoleren, maar tevens moeten de PV-modules steeds om-en-om worden geïnstalleerd, omdat de polariteit wisselt. Dit introduceert belemmeringen voor de eenvoudige installatie, en bovenal een “onveilige” situatie, die bij 2xN wordt vermeden.

3.4.4. Conclusies

- Om als stroomgeleider te kunnen fungeren is een minimum van 60 mm² geleidend doorsnedeoppervlak vereist.
- Dit is beduidend minder dan de dikte vereist voor het dragen van de PV-modules, waarvoor een doorsnedeoppervlakte van circa 120 mm² nodig is.
- De energetische terugverdientijd van aluminium bij deze dikte is acceptabel met 2,5 maanden, gebaseerd op niet gerecycled aluminium.
- Naar de mening van OKE geniet een systeem met 2xN stroombussen de voorkeur boven een N+1 systeem, aangezien een 2xN-systeem simpel en eenduidig is voor de installateur en geen extra veiligheidsmaatregelen vereist. Bovenal moet in een N+1-systeem de module aan de lange kant worden ondersteund, omdat de overspanning te groot wordt; met andere woorden, de stroombus – als drager van de PV-modules – wordt slecht genut.
- Ook dient het combineren van plus en minstroombus in bijvoorbeeld een rail te worden vermeden; dit roept te veel belemmeringen op, en doet afbreuk aan de eenvoud en veiligheid van het concept PV-wireless.

3.5. Verbinding tussen stroombus en inverter

3.5.1. Aanleiding en vraag

De grote vraag inzake dit onderdeel is hoe de (hoge) stroom zonder noemenswaardige elektrische verliezen in de inverter kan worden ingevoerd. Hoe dient die verbinding eruit te zien? Daarbij moet worden gerealiseerd dat indien deze verbinding niet “zeker” is het gehele systeem geen stroom zal leveren aan het centrale electriciteitsnet; kortom, de verbinding dient zeer betrouwbaar te zijn. Derhalve zullen ook de mogelijkheden van redundantie worden onderzocht.

De voor dit onderdeel geformuleerde vraag luidt derhalve: Hoe kan een goede verbinding tot stand worden gebracht tussen de stroombus (geleidende drager: grote diameter, onbekend materiaal) en de inverter zonder in te boeten op veiligheid en betrouwbaarheid.

3.5.2. Werkzaamheden, werkwijze

Dit onderdeel van de haalbaarheidsstudie is volledig door Henk Oldenkamp verricht. Het merendeel van de werkzaamheden betrof het raadplegen van experts en bronnen (materialen), alsmede het uitvoeren van berekeningen.

3.5.3. Resultaten

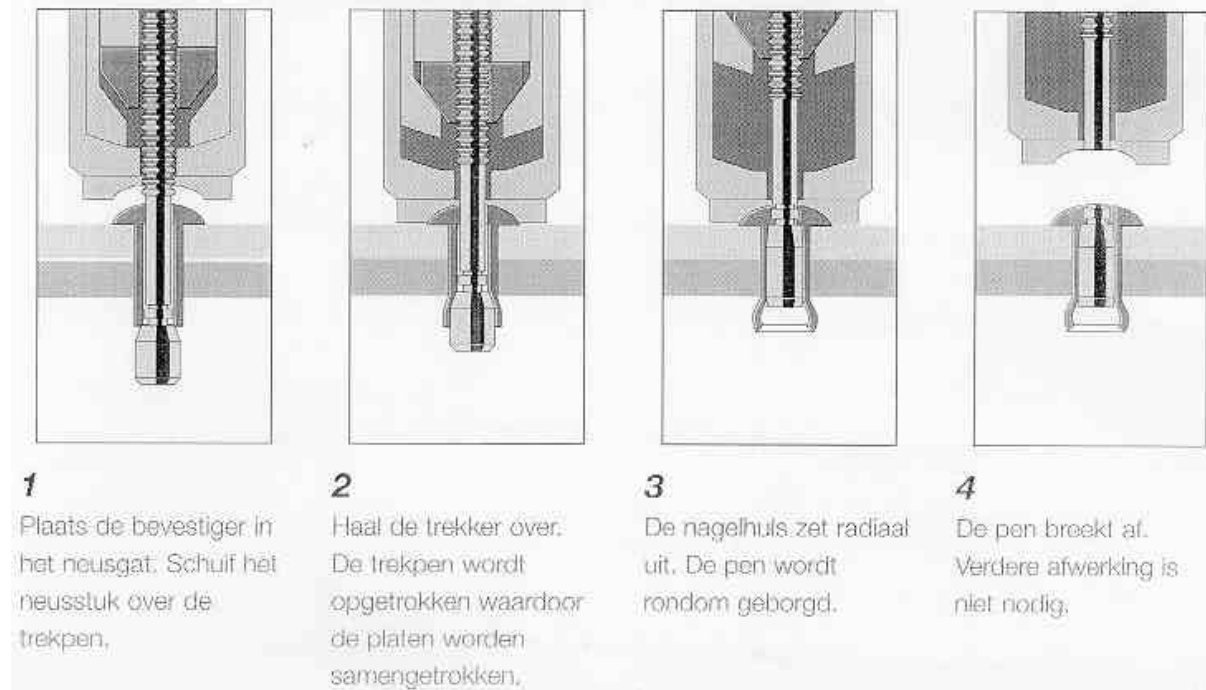
Dit onderdeel bleek minder problematisch dan in eerste instantie voorzien. Er blijken technieken voor handen waarmee een betrouwbare aluminium-koper overgang tot stand kan worden gebracht, die gebaseerd zijn op een gelaste aluminium-koper overgang. Echter, de kosten hiervan zijn hoog, en sluiten derhalve slecht aan bij de doelstellingen van PV-wireless.

Tijdens de studie ontstaat het idee om de contactovergang met popnagels te maken, een goedkope oplossing die bovenal goed verkrijgbaar is. Na het raadplegen van databoeken, overleg met

fabrikanten, blijkt (slechts) een type popnagel geschikt voor deze toepassing (zie figuur 3.5.1). Gebruik van deze popnagel resulteert in een gasdichte verbinding, zodat de kans op corrosie minimaal is. Mogelijk dient het aluminium gechromateerd te worden.

De werking van deze popnagel wordt geïllustreerd in Figuur 3.5.1. De popnagel wordt ingebracht volgens (1). Vervolgens wordt het onderste einde omhoog getrokken (2). Voor een normale popnagel zou dit de eindpositie zijn. Bij dit type wordt de cilinder geheel omhoog getrokken, waardoor over vrijwel de hele lengte een radiale uitzetting gegarandeerd is. Gebruik van deze popnagel lijkt voldoende om het contact te fixeren. Wel zou ter plaatse (op het dak dus) met een boormachine een gat worden geboord, waarmee door de anodisatielaag wordt geboord, zodat het contactoppervlak altijd schoon (vers) is. Indien gewenst kunnen de gaten ook voor plaatsing op het dak worden geboord.

Aan deze oplossingsrichting zijn reeds diverse metingen verricht (1000 cycli). De resultaten zijn veelbelovend; er is nog geen degradatie opgetreden. Nadrukkelijk zij echter vermeld dat nog aanvullende voorzieningen nodig zijn, i.c. een redundantie van de verbinding moet worden aangebracht. Immers, indien deze verbinding om welke reden dan ook wordt verbroken, zal het gehele PV-systeem geen stroom meer leveren. Ook voor een redundante verbinding zijn reeds oplossingen bedacht, echter deze dient elektrisch en mechanisch te worden getest.



Figuur 3.5.1. Geselecteerde popnagel voor verbinding tussen stroom- en inverterbus

3.5.4. Conclusies

- Er zijn technieken voor handen waarmee een betrouwbare aluminium-koper overgang tot stand kan worden gebracht. Echter, de kosten hiervan zijn hoog, en sluiten derhalve slecht aan bij de doelstellingen van PV-wireless.
- Een mogelijke kostentechnisch acceptabele oplossing zou kunnen liggen in het gebruik van een aluminium strip (ca. 40 x 2 mm) die met een speciaal type popnagel aan de stroombus wordt bevestigd. Aan deze oplossingsrichting zijn reeds diverse metingen verricht (1000 cycli); de resultaten zijn veelbelovend.
- Redundantie van de verbinding is noodzakelijk. Immers, indien deze verbinding om welke reden dan ook wordt verbroken, zal het gehele PV-systeem geen stroom meer leveren. Om redundantie te verkrijgen kunnen meerdere popnagels worden gebruikt.

3.6. Omzetter

3.6.1. Aanleiding en vraag

Binnenkort zal de eerste inverter op de markt worden geïntroduceerd, die een lage spanning (12 Volt) omvormt naar een hoge spanning (230 AC). Deze inverter – de OK5 van NKF – is ontwikkeld door Henk Oldenkamp. Echter, de in deze inverter toegepaste topologie kan niet zonder meer worden opgeschaald naar hogere vermogens – zoals voorzien voor PV-wireless. Toepassing van traditionele topologieën zullen leiden tot groot materiaalverbruik, en is dus niet acceptabel. Derhalve is het noodzakelijk nieuwe topologieën te verkennen. Een belangrijke voorwaarde die aan de omzetter wordt gesteld is dat deze niet duurder mag zijn dan traditionele omzeters.

Nadrukkelijk zij erop gewezen dat het in deze haalbaarheidsstudie niet gaat om een verkenning van een volledig nieuwe inverter; het betreft slechts het verkennen van de mogelijkheid of de omzetting van een hoge stroom – lage spanning naar een lage stroom – hoge spanning mogelijk is.

De voor dit onderdeel geformuleerde vraag luidde derhalve: Is het mogelijk een omzetter te ontwikkelen die in staat is met voldoende hoog rendement de hoge stroom (lage spanning) om te vormen naar een lage stroom (hoge spanning)?

3.6.2. Werkzaamheden, werkwijze

De werkzaamheden betroffen het verkennen van nieuwe topologieën, waarvoor Oldenkamp berekeningen en simulaties heeft uitgevoerd. Ook zijn aan een eerste prototype verkennende metingen verricht.

3.6.3. Resultaten en conclusies

Berekeningen en simulaties hebben aangetoond dat het mogelijk is met een voldoende hoog rendement, van ca. 98%, de hoge stroom (lage spanning) om te vormen naar een lage stroom (hoge spanning). Het gaat om een verkenning van een omzetter (DC hoge stroom/lage spanning naar DC lage stroom-hoge spanning), dus niet van een inverter (gelijkstroom naar wisselstroom), die na deze omzetter wordt geplaatst.

Praktijkmetingen – aan de OK5 – resulteren in rendementen van 94-95%. Gezien de resultaten van de berekeningen en simulaties is OKE van mening dat met andere topologieën betere resultaten kunnen worden behaald; een DC-DC-omzetting van 96-97% lijkt haalbaar.



Figuur 3.5.2. Dummy inverter voor PV-wireless, zoals gepresenteerd op conferentie PV for Europe, 7-10 oktober 2002, Rome

Als de DC naar AC-omzetting in hetzelfde apparaat kan worden geïntegreerd, lijken piekrendementen van 94-95% - voor de totale omzetting van ca. 15Vdc naar 230 Vac) tot de mogelijkheden te behoren. Dit is vergelijkbaar met rendementen van trafoloze omzetters.

3.7. Normen

3.7.1. Aanleiding en vraag

Het is uiteraard van essentieel belang dat het concept voldoet aan de van toepassing zijnde normen voor PV-inverters en -systemen, niet alleen in Nederland, maar ook daarbuiten. Henk Oldenkamp is zelf lid van de NEC 82 voor PV-inverters, alsmede van de UL 1741 in de Verenigde Staten.

De voor dit onderdeel geformuleerde vraag luidde derhalve: Voldoet het concept PV-wireless aan de van toepassing zijnde PV-normen?

3.7.2. Werkzaamheden, werkwijze

Reeds vanaf het begin is door OKE onderkend dat dit concept voor een deel “buiten de gevestigde normen” reikt. Daarom is overleg gevoerd met “normenexperts” (KEMA voor Nederland, UL en NEC voor de Verenigde Staten, CSA voor Canada) om na te gaan in hoeverre zij “openstaan” voor het concept, en de perceptie van OKE inzake veiligheid en andere eisen.

3.7.3. Resultaten

Uit de haalbaarheidsstudie blijkt dat het concept PV-wireless niet voldoet aan vigerende PV-normen. De reden hiervan is gelegen in het feit dat huidige PV-normen geen rekening houden met een configuratie, waarop PV-wireless is gebaseerd, namelijk het parallel schakelen van een groot aantal PV-modules, resulterend in een lage spanning en een hoge stroom. Dit impliceert geenszins dat het concept niet veilig is (zie ook paragraaf 3.8), doch dat de PV-normen simpelweg alleen gebaseerd zijn op PV-systemen, waarin de PV-modules in serie zijn geschakeld.

Algemeen heerst de opvatting dat indien er meer dan 3 PV-modules parallel worden geschakeld dit kan leiden tot onveilige situaties. In het kader van dit project heeft Henk Oldenkamp het artikel *Detailed analysis of currents in PV-shunts* (down te loaden vanaf <http://www.pv-wirefree.com>) geschreven, een goede basis om de discussie met norminstellingen aan te gaan. Uit dit artikel blijkt dat, onder zeker voorwaarden, het zonder meer mogelijk is om een groot aantal panelen veilig parallel te schakelen.

Dit artikel is inmiddels globaal geverifieerd door het ECN, waarin de volgende stellingen zijn bevestigd:

- De stroom door een PV-module in een PV-shunt is onder alle omstandigheden veilig begrensd door de fysica van de cellen. Dit geldt voor belichte en niet belichte (donkere) modules.
- Als een paneel geen bypass diodes heeft dan wordt de waarde van $2 \times I_{sc}$ – die nu algemeen wordt geaccepteerd als veilige waarde) pas overschreven worden als meer dan zes cellen in een paneel in sluiting zijn.
- Het toepassen van bypass diodes is zelfs ongewenst: in de veiligheidsanalyse is deze component verantwoordelijk voor de noodzakelijke toevoeging van zekeringen.
- Als de inverter de shunt niet belast onder V_{mpp} , dan kunnen er geen hot spots optreden, en zijn bypass diodes overbodig.
- De mismatch verliezen in een PV-shunt zijn verwaarloosbaar klein, zelfs wanneer de panelen zeer ongelijkmatig belicht zijn.
- Temperatureffecten hebben een gunstig effect op de ‘feedback’ stromen van onbelichte modules; er treedt stabilisatie op.

- Hoe meer cellen van een module in sluiting zijn, hoe kleiner de kans dat een volgende cel in sluiting gaat.
- Een slechte connectorovergang kan onder geen enkele omstandigheid tot brandgevaar leiden.
- Alle geleiders in de PV-shunt zijn aanraakveilig.

Gesprekken met KEMA duiden erop dat zij openstaan voor het concept, en voorzichtig onderkennen dat het concept voldoet aan de eisen en overwegingen, die ten grondslag liggen aan de huidige normen. Echter, tegelijkertijd wordt onderkend dat aanpassing van de normen nodig is, om ook dit concept in te passen in de PV-normen. Om dit tot stand te brengen, is het essentieel in een vervolgstadium hieraan veel aandacht te besteden. Immers, indien de PV-normen niet mede parallel schakelen van PV-modules (PV-shunt) omvat, wordt het toepassen van het concept niet gedekt vanuit de normen.

De “formeel” verificatie van het artikel *Detailed analysis of currents in PV-shunts* door het ECN, i.c. alle voornoemde stellingen, is in deze discussie essentieel; alleen indien de theorie inzake PV-shunt – en dus PV-wireless – formeel wordt geaccordeerd door een energieonderzoekcentrum als ECN, zullen norminstellingen bereid zijn een stap verder te zetten in hun denken en hun uitgangspunten bij PV-systemen.

3.7.4. Conclusies

- Het concept PV-wireless voldoet niet aan bestaande PV-normen, omdat in de huidige PV-normen geen rekening wordt gehouden met het parallel schakelen van een groot aantal PV-modules, resulterend in een lage spanning en een hoge stroom.
- De belangrijkste drempel is de algemeen heersende opvatting dat indien meer dan 3 PV-modules parallel worden geschakeld dit kan leiden tot onveilige situaties.
- OKE heeft het artikel *Detailed analysis of currents in PV-shunts* geschreven, een goede basis om de discussie met norminstellingen aan te gaan. Uit dit artikel blijkt dat, onder zeker voorwaarden, het zonder meer mogelijk is om een groot aantal panelen veilig parallel te schakelen. Dit artikel is inmiddels globaal geverifieerd door het ECN.
- Gesprekken met KEMA duiden erop dat zij openstaan voor het concept, en voorzichtig onderkennen dat het concept voldoet aan de eisen en overwegingen, die ten grondslag liggen aan de huidige normen.
- Echter, tegelijkertijd wordt onderkend dat aanpassing van de normen nodig is, om ook dit concept in te passen in de PV-normen.
- Om dit tot stand te brengen, is het essentieel in een vervolgstadium hieraan veel aandacht te besteden. Immers, indien de PV-normen niet mede parallel schakelen van PV-modules (PV-shunt) omvat, wordt het toepassen van het concept niet gedekt vanuit de normen.
- De “formeel” verificatie van het artikel *Detailed analysis of currents in PV-shunts* moet onderdeel vormen van het vervolgtraject.

3.8. Veiligheid

3.8.1. Aanleiding en vraag

OKE meent dat een ieder betrokken in de PV-industrie ernaar moet streven “inherently safe” PV-systemen te leveren. Een fout, een ongeluk, kan fotonvoltaïsche zonne-energie een negatief imago geven wat ten aller tijde moet worden voorkomen. Daarom hecht OKE-Services er groot belang aan de het concept van PV-wireless “inherently safe” is. Dit betekent dat het niet alleen volgens de gangbare normen veilig dient te zijn, maar ook ten allen tijde veilig, hoe “onbedachtzaam een consument” ook kan zijn. Vanuit dit perspectief meent OKE-Services dat de keuze voor een laagspanningssysteem gerechtvaardigd is, zeker vergeleken met de gangbare serieschakelingen.

De geformuleerde vraag voor dit onderdeel was: Is het concept PV-wireless “inherently safe”. Of met andere woorden: is het niet gevaarlijk om een stroombus aan te raken, die een zeer hoge stroom geleidt (aanraakveiligheid)? En leidt het onderbreken van een zo hoge stroom niet tot brandgevaar?

3.8.2. *Werkzaamheden, werkwijze*

Naast nauw overleg met KEMA en UL, heeft OKE praktijktesten uitgevoerd.

3.8.3. *Resultaten*

Om na te gaan of het concept “inherent aanraakveilig” is, zijn door Henk Oldenkamp laboratorium- en praktijktesten uitgevoerd, waarin hij zelf en anderen als “proefpersoon” hebben gefungeerd. Hiervoor zijn 80 PV-modules (12 Volt) parallel geschakeld, resulterend in een stroom van 190 Ampère. De stroombus was – uiteraard – volledig aanraakveilig. Vervolgens heeft Oldenkamp bewust een kortsluiting veroorzaakt en deze vervolgens weer onderbroken waarbij beide kanten van de onderbreking met blote hand werden vastgehouden (geen isolatie). Dit experiment is vervolgens en groot aantal malen herhaald (ook door diverse andere proefpersonen). Uit zowel metingen – als video-opnamen – blijkt dat er geenszins een gevaarlijke situatie ontstaat: de spanningen blijven altijd onder de onbelaste paneelspanning (ca 20 Volt). Deze spanning is te laag om een vlamboog in stand te houden, en wordt algemeen als aanraakveilig beschouwd.

Een tweede aspect is de brandveiligheid van het concept. De heersende gedachte is dat door oververhitting in het contact op een bepaalde spot, brandgevaar kan optreden. Ter toelichting een korte berekening. In geval van een string (serieschakeling) van 20 (12 Volt) PV modules van 80 Watt is de open spanning circa $20 \times 12 = 240$ Volt, en het beschikbaar vermogen $20 \times 80 = 1600$ Watt, bij een stroom van 5 Ampère. Om de stroom te geleiden wordt doorgaans een $2,5 \text{ mm}^2$ koperen bedrading gebruikt. Indien een van de connectoren faalt of de bedrading ergens breekt, zal een substantieel deel van de volledige spanning (240 Volt) en van het volledige vermogen (1600 Watt) beschikbaar zijn voor het verwarmen van deze plaats. Dit zal – uiteraard – leiden tot een extreme temperatuurverhoging, een brandgevaarlijke situatie. Dit is dan ook de reden dat zulke hoge eisen worden gesteld aan DC-connectoren en kabels (en hoge kosten).

Vergelijk dit met een PV-shunt, waarin de PV-modules parallel zijn geschakeld. Nu komt per connectorovergang slechts een deel van het paneel vermogen (80 Watt) beschikbaar bij maximaal 22 Volt en een stroom van 5 Ampères. Bovendien is nu een stroombus van 120 mm^2 beschikbaar; de warmtegeleiding van deze aluminium stroombus is ca. 30 keer beter dan de warmtegeleiding van de $2,5 \text{ mm}^2$ koperen geleider. Omdat bovendien het vermogen een factor 20 lager is, zal de opwarming van de stroombus ten gevolge van falen een factor 600 kleiner zijn.

Een ander voordeel is dat de stroombus mechanisch veel sterker is dan de bedrading van $2,5 \text{ mm}^2$. Breken van de stroombus is hierdoor uitgesloten. Niet alleen wordt het brandgevaar geëlimineerd, maar ook de faalkans wordt dus beduidend lager.

3.8.4. *Conclusies*

- PV-wireless is - ook bij grote aantallen parallel geschakelde PV-modules - volledig aanraakveilig. De onbelaste PV-spanning van 20 Volt is te laag om een vlamboog in stand te houden, en leidt dus bij onderbreking van de kortsluitstroom niet tot een gevaarlijke situatie.
- Het brandgevaar wordt – zeker ten opzichte van vigerende PV-systemen –beduidend minder om drie redenen: Allereerst doordat het beschikbare vermogen en spanning voor lokale verwarming van de stroomdraad (stroombus) veel geringer is. Ten tweede doordat het oppervlak/doorsnede van de stroombus in PV-wireless veel groter is. En ten derde omdat de stroombus veel sterker is dan een normale DC-bedrading van $2,5 \text{ mm}^2$. Hierdoor is de kans op breken van de stroomgeleider minimaal, en dus ook de faalkans.

Het voorgaande impliceert dat het concept inherent veilig moet worden geacht: een slechte connector overgang kan onder geen enkele omstandigheid tot brandgevaar leiden, terwijl alle geleiders in een PV-shunt systeem aanraakveilig zijn. Hierdoor worden diverse van de componenten van een PV-string overbodig, namelijk die componenten die juist zijn toegevoegd wegens veiligheidsoverwegingen:

- High voltage DC-kabel (dubbel geïsoleerd)
- DC-connectoren
- Klasse II isolatie van alle componenten
- DC-zekeringen
- DC-overspanningsbeveiliging
- DC-isolatiebewaking bij een trafeloos systeem
- Veiligheidsaarding

3.9. Elektrische en energetische aspecten: vergelijking serieschakeling met PV-wireless

3.9.1. Aanleiding en vraag

Dit onderdeel van de haalbaarheidsstudie richt zich op de elektrische en energetische vergelijking van de beide systemen. Het PV-wireless concept impliceert hoge stromen in de geleider, met hoge verliezen tot gevolg. Onderzocht is of deze verliezen beheersbaar zijn, i.c. niet hoger worden dan de verliezen ten gevolge van mismatch verliezen ten gevolge van serieschakeling van PV-modules. Daarnaast is nagegaan of de energie-inhoud van het materiaal dat gebruikt wordt voor de geleiders niet te hoog is mede gezien de opbrengst van PV-systemen/modules.

De geformuleerde vraag voor dit onderdeel luidde derhalve: Wat zijn de voor- en nadelen van respectievelijk serieschakeling en PV-wireless, en weegt het concept in energetisch opzicht op tegen serieschakeling?

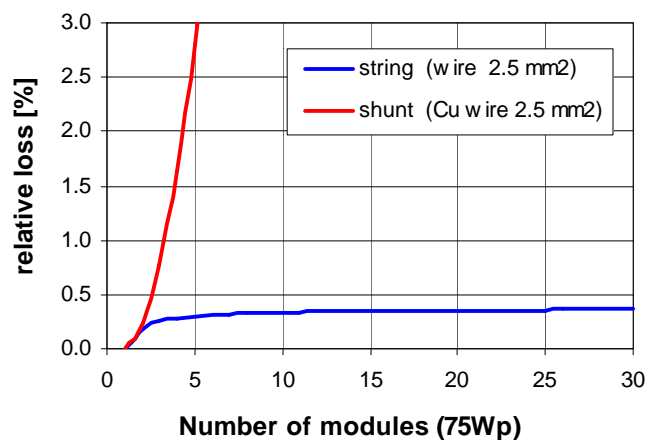
3.9.2. Werkzaamheden, werkwijze

Dit onderdeel van de studie – berekeningen en simulaties – zijn uitgevoerd door Henk Oldenkamp.

3.9.3. Resultaten

3.9.3.1. Voor- en nadelen van serie- en parallelschakeling

PV-string-systemen, waarin PV-modules in serie worden geschakeld zijn allereerst overzichtelijk, en de elektrische bedrading is eenvoudig. Een tweede belangrijk voordeel is, dat de verliezen in de bedrading laag zijn, zoals ook blijkt uit Figuur 3.9.1. Hierin zijn ook de relatieve verliezen in de bedrading weergegeven wanneer PV-modules parallel worden geschakeld; deze zijn beduidend hoger en nemen meer dan kwadratisch toe bij toename van het aantal PV-modules. Echter, Figuur 3.9.2 laat zien dat deze weer afnemen met een toename van de doorsnede van de geleidende drager, doch het voorgaande impliceert wel dat er een limiet is aan het aantal parallel te schakelen PV-modules, opdat de verliezen in deze geleidende drager

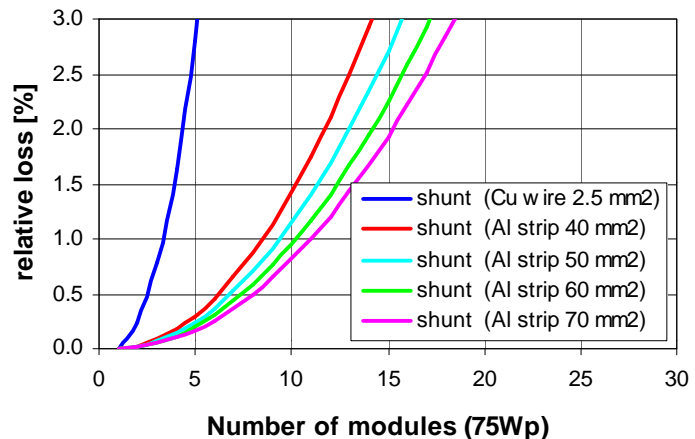


Figuur 3.9.1. Verliezen in DC-bedrading bij PV-string en PV-shunt systemen

niet te hoog worden. Kortom, PV-shunt-systemen vereisen dikke geleiders wegens de hoge DC-stromen; dit is tevens het belangrijkste nadeel van parallelschakeling van PV-modules.

Nadelen van PV-string-systemen zijn:

- Hoge DC-spanning op panelen en bedrading
- Hot spot problemen in de cellen bij partiële beschaduwing.
- Mismatch verliezen
- Veel connectorovergangen in serie, waarbij geen redundantie wordt toegepast. Dit betekent dat indien een connector faalt, het gehele systeem niet meer functioneert.



Figuur 3.9.2. Verliezen in DC-bedrading PV-shunt systemen bij verschillende dikte van stroomgeleider

Deze nadelen komen bij PV-shunt systemen – mits goed gedimensioneerd - niet voor, en resulteren in de volgende voordelen van parallelschakeling:

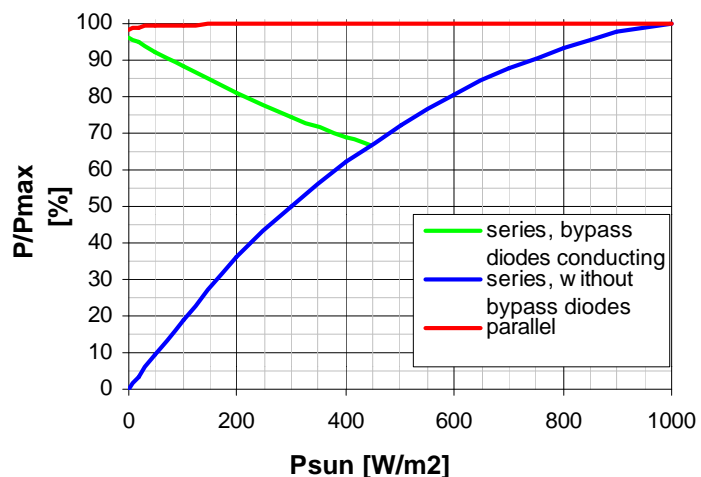
- Zeer lage DC-spanning op panelen en bedrading
- Geen hot spot problemen bij partiële beschaduwing.
- Geen mismatch verliezen
- Geen connectorovergangen in serie, veel redundantie

Doch daarnaast zijn belangrijke voordelen van parallelschakeling van PV-modules

- Inherente veiligheid wegens de lage DC-spanning
- Mechanische en elektrische functies kunnen gecombineerd worden
- Overzichtelijke en eenvoudige elektrische bedrading

3.9.3.2. Elektrische eigenschappen van serie- en parallelschakeling

De *mismatch verliezen* in een PV-shunt zijn verwaarloosbaar klein, zelfs wanneer de panelen zeer ongelijkmatig belicht zijn, zoals blijkt uit Figuur 3.9.3. Hierin is de output van twee parallel geschakelde PV-modules vergeleken met de output van twee in serie geschakelde PV-modules. De eerste PV-module is 100% belicht (1000 W/m^2), de belichting van de tweede PV-module varieert van 0 tot 100% (1000 W/m^2). Op de verticale as is P/P_{max} uitgezet, zijnde de output gedeeld door de maximale output voor de gegeven situatie. P_{max} is gedefinieerd als de maximale output van beide PV-modules, indien deze onafhankelijk van elkaar, in hun eigen M_{pp} belast zouden worden. De rode lijn representeert de output in geval van parallelschakeling, en laat zien dat deze vrijwel over de gehele linie 100% is. Er is sprake van perfecte matching, want de output van het ene PV-paneel heeft geen invloed op die van de andere. In geval van serieschakeling

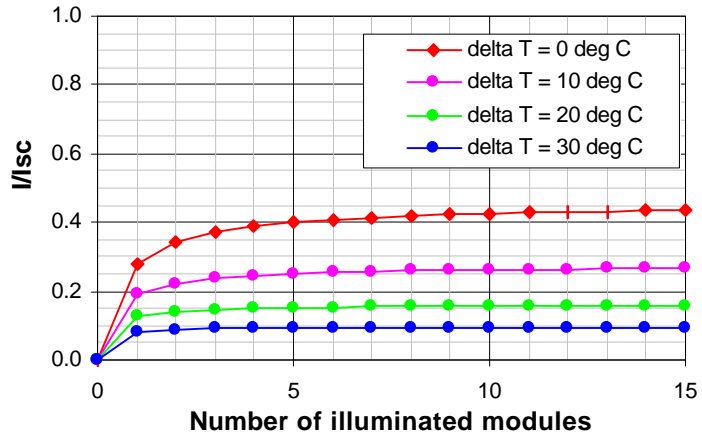


Figuur 3.9.3 Relatieve energieopbrengst 2 PV-modules geschakeld in serie en parallel, waarbij belichting van 1 PV-module varieert van 0 tot 1000 W/m^2

blijkt een groot verlies; alleen wanneer beide panelen optimaal worden belicht is er sprake van 100% output. De totale output van het PV-systeem daalt lineair tot nul met de afname van de belichting van het tweede paneel. Door het gebruik van bypass diodes wordt dit verlies beperkt (groene lijn), doch deze bypass diodes gaan pas werken wanneer het verschil in instraling tussen de twee PV-modules groter is dan een factor 2.

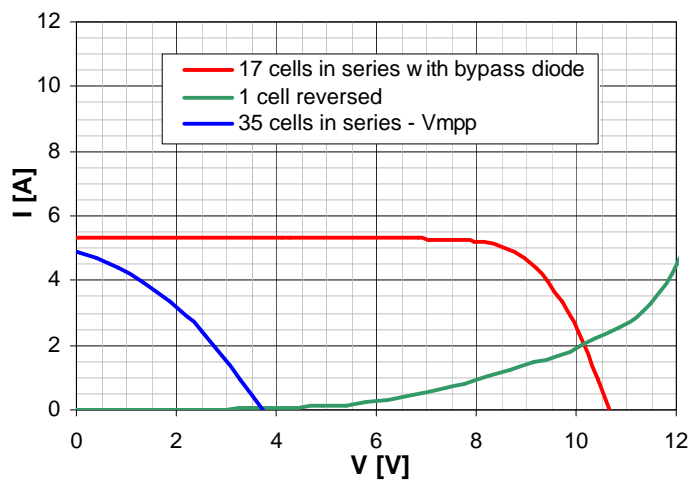
De stroom in een PV-shunt is onder alle omstandigheden veilig begrensd

door de fysica van de cellen. Dit geldt zowel voor belichte als niet-belichte PV-modules: In grafiek 3.9.4 wordt dit toegelicht. Hierin is de terugvloeiende stroom (back feeding current) van een niet belichte PV-module weergegeven in een PV-systeem waarin meerdere (0-15) PV modules parallel zijn geschakeld. Hieruit blijkt dat deze stroom nooit hoger wordt dan 0,45 I_{sc} ; dit is de meeste ongunstige situatie, waarbij uitgegaan is van de (zeer onwaarschijnlijke) situatie van een temperatuurverschil van 0 graden Celsius. Temperatureffecten hebben een gunstig effect op de back-feeding stromen van de onbelichte modules, waardoor deze zal afnemen.



Figuur 3.9.4. Genormaliseerde back-feeding current in een niet belichte PV-module in een PV-shunt van 0 tot 15 PV-modules bij verschillende temperatuur-verschillen tussen het onbelichte paneel en de belichte panelen

Bypass diodes zijn toegevoegd aan een PV-module om te voorkomen dat een beschaduwde cel andere cellen beschadigt. Immers, indien een cel niet belicht wordt, kunnen hot spots ontstaan. Dit is weergegeven in figuur 3.9.5: de (omgekeerde) stroom in de onbelichte cel blijft lang laag, doch neemt sterk toe met een toename van de spanning. De grafiek snijdt de IV-kromme van de resterende 17 (belichte) cellen in serie met bypass diodes bij ca. 10 Volt. In figuur 3.9.6. is – op basis van dezelfde data – het vermogen op de verticale as uitgezet, en is de dissipatie in de onbelichte cel – in het geval van serieschakeling 20 Watt – vergeleken met die in parallelschakeling. De dissipatie in de onbelichte cel is in een PV-shunt slechts 0,2 Watt. Kortom, indien PV-modules parallel worden geschakeld zijn geen bypass diodes nodig.

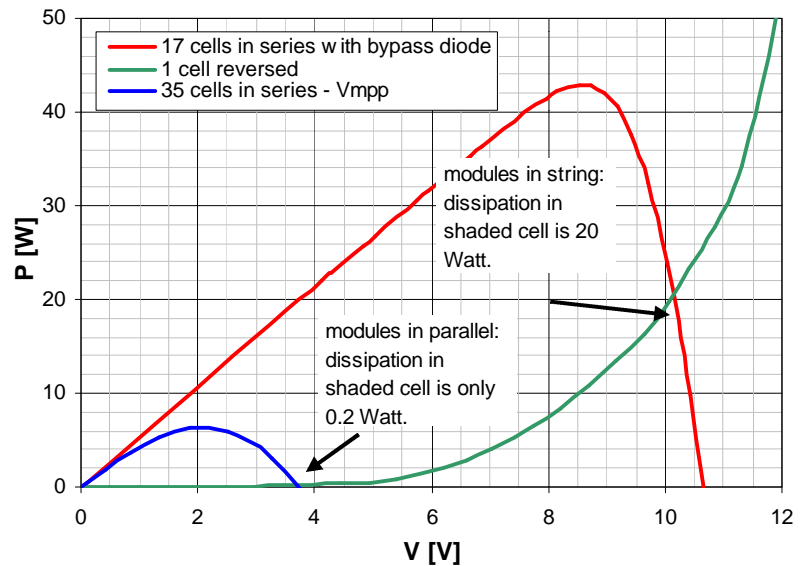


Figuur 3.9.5. Het ontstaan van een hot-spot in een serieschakeling bij 10 Volt en 2 Ampère

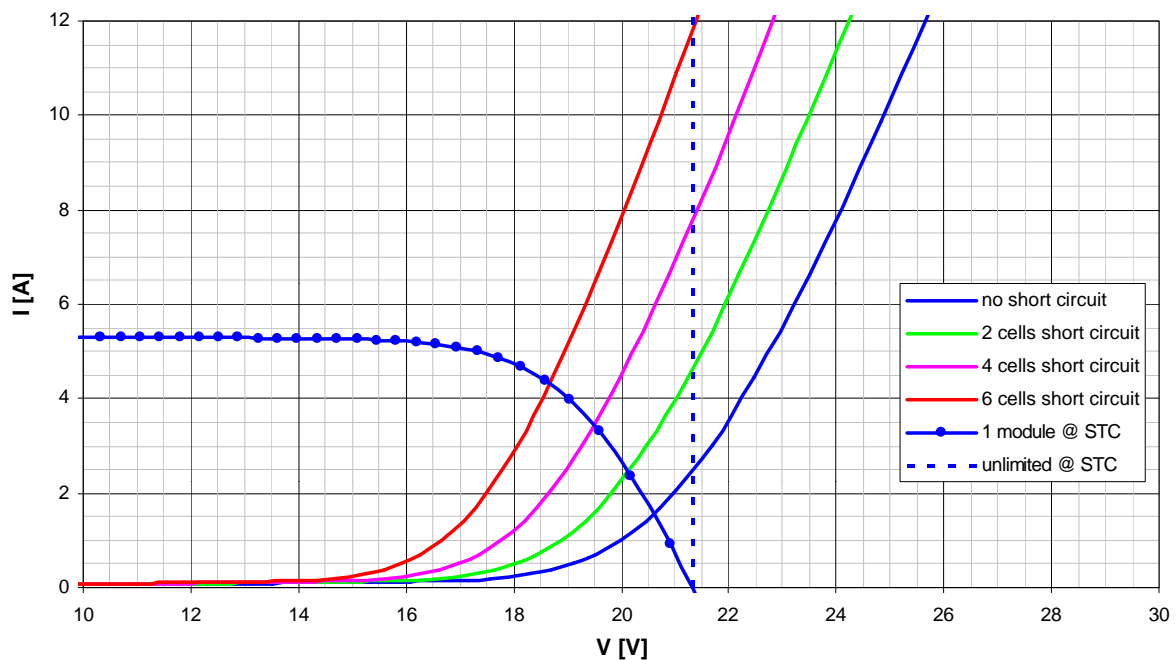
Dit is een belangrijke conclusie. Immers, het foutmechanisme van bypass diodes (kortsluiting) introduceert een kans op een onveilige situatie, waardoor het noodzakelijk wordt DC-zekeringen aan een PV-systeem toe te voegen. De hiervoor gepresenteerde conclusies omtrent de back feeding current in PV-shunt systemen zijn alleen van toepassing indien **geen** bypass diodes worden toegepast.

De vraag is echter of het niet toepassen van bypass diodes in een PV-module ook vanuit andere oogpunten acceptabel is, met name vanuit veiligheidsoogpunt.

In figuur 3.9.7 is de stroom uitgezet tegen de spanning voor een PV-module zonder bypass modules waarin 2, 4 en 6 cellen kortgesloten zijn. Hieruit blijkt dat minimaal 6 cellen in een PV-module van 36 cellen een harde kortsluiting moeten vormen om in deze module een stroom $> 2 \times I_{sc}$ (back feeding) te genereren. Hoe meer cellen van een module (reeds) in sluiting zijn, hoe kleiner de kans is dat ten gevolge van hot spot problemen een volgende cel in sluiting gaat. Er treedt dus geen sneeuwbaaleffect op.



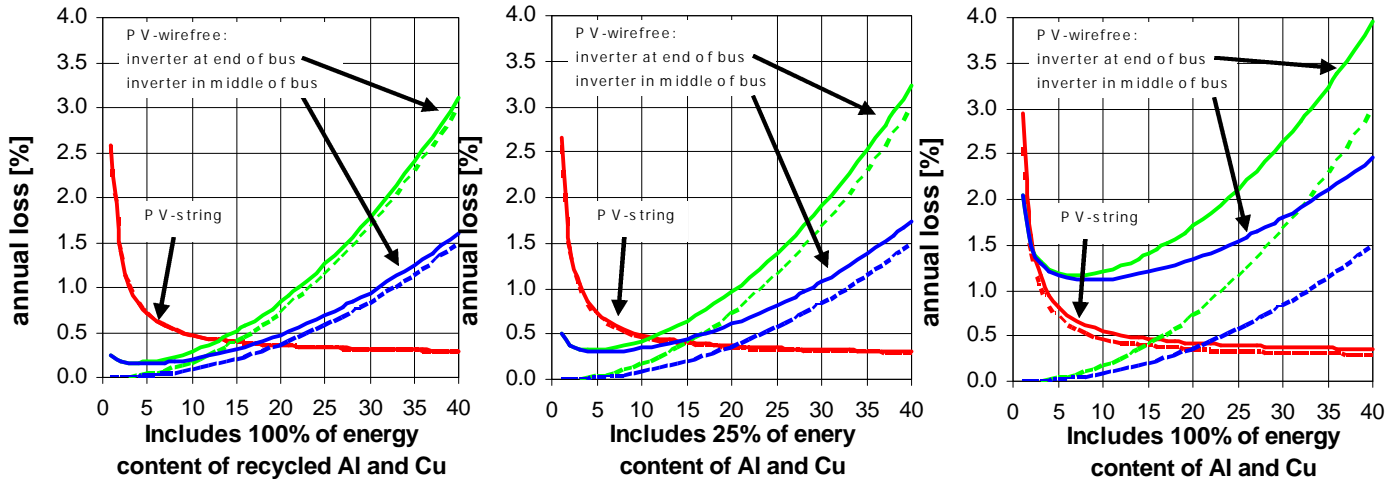
Figuur 3.9.6. Vermogensdissipatie door een onbelichte PV-cel in een PV-module in een PV-string en in een PV-shunt



Figuur 3.9.7. I-V curves van een beschaduwde PV-module en beschaduwde PV-modules met 2, 4 en 6 cellen die kortgesloten zijn

3.9.3.3 Totale energieverliezen in elektrische geleiders van PV-string en PV-shunt

Zoals reeds aangegeven in paragraaf 3.9.1 worden PV-systemen waarin PV-modules parallel worden geschakeld gekenmerkt door hogere verliezen in de geleiders. Deze kunnen worden beperkt door dikke bedrading te kiezen. Gezien de PV-wireless stroombus met een doorsnede van 120 mm^2 is dit nadeel van parallel geschakelde systemen vrijwel de wereld uit geholpen.



Figuur 3.9.8. Energieverliezen in elektrische geleiders van een PV-string systeem en een PV-wireless systeem

Onderbroken lijn representeert verliezen in elektrische geleiders (I^2R), niet onderbroken lijn de verliezen in de elektrische geleiders tezamen met de energie-inhoud van de geleiders uitgaande van een levensduur van 20 jaar. Gehanteerde uitgangspunten: PV-laminaten van 75 Wp@5 A, PV-string systeem gebruikt 2.5 mm² koperdraad, 2 meter per module voor interconnectie tussen PV-modules. De afstand tussen de modules en inverter is 10 meter. PV-wireless stroombus heeft doorsnede van 120 mm², breedte PV-modules is 0,7 m. The PV-wireless inverter wordt gemonteerd op stroombus.

Zoals figuur 3.9.8 laat zien, blijven de energieverliezen in de elektrische geleider in een PV-wireless systeem zelfs onder die van een PV-string systeem voor systemen tot 15 PV-modules. De verliezen in de geleiders met meer PV-modules worden hoger, maar de toename blijft onder 1%. Gezien de rendementswinst die bijvoorbeeld wordt gemaakt door het vermijden van mismatch-verliezen, is dit acceptabel.

3.9.4. Conclusies

- Parallel schakelen is in energetisch opzicht een stuk interessanter is dan serieschakeling. Weliswaar is er sprake van een hoger verlies in de “bedrading” (stroombus) (hooguit ca 1% op jaarbasis), doch dit weegt ruim op tegen de winst die wordt gerealiseerd door het vermijden van “mismatch losses” die kan oplopen tot 5-15%.
- Belangrijker nog is dat de betrouwbaarheid van het gehele systeem enorm toeneemt, wat leidt tot een grote winst. Immers, indien in een seriegeschakeld systeem een connector (vele connectoren in een PV-systeem), of een ander deel van de verbinding (DC-bedrading) niet functioneert, zal het gehele systeem niet meer functioneren. In een systeem waarin PV-modules parallel zijn geschakeld, is hiervan geen sprake. Mocht een van de elektrische verbindingen tussen PV-module en stroombus niet werken, zullen de andere PV-modules stroom blijven leveren.

3.10. Systeemgrootte: vergelijking serieschakeling met PV-wireless

3.10.1. Vraag

De voor dit onderdeel geformuleerde vraag luidde: Wat is de optimale systeemgrootte voor het concept PV-wireless? Het gaat niet zozeer om een kostencalculatie, doch veeleer om de fysische en pragmatische grenzen van het concept, alsmede de opbrengst (rendement, c.q. verliezen) bij verschillende systeemomvang.

3.10.2. Werkzaamheden, werkwijze

De berekeningen inzake systeemgrootte zijn uitgevoerd door OKE-Services.

3.10.3. Resultaten

Met de voorgestelde stroombus (120 mm²) kan het concept PV-wireless worden toegepast voor PV-systemen van 0 tot ca. 4 kW. Echter, dit sluit niet uit dat het concept juist ook zeer interessant is voor grotere systemen. alleen dient dan de stroombus een andere doorsnede te hebben.

Gezien de huidige praktijk, afmetingen van PV-modules en afmetingen van huizen lijken eenheden van 600-1200 Watt een goede aanzet, want dit resulteert in een lengte van de stroombus van 6-12 meter. Daarbij dient te worden gerealiseerd dat met de voorgestelde stroombus strekkende eenheden van 32 meter worden gerealiseerd.

3.10.4. Conclusies

- Met de huidige stroombus (120 mm²) kan het concept PV-wireless worden toegepast voor PV-systemen van 0 tot ca. 4 kW. Echter, dit sluit niet uit dat het concept juist ook zeer interessant is voor grote systemen, alleen dient dan de stroombus een andere doorsnede te hebben.
- Gezien de huidige praktijk, afmetingen van PV-modules en afmetingen van huizen lijkt een systeemgrootte van 600-1200 Watt, want dit resulteert in een lengte van de stroombus van 6-12 meter.

3.11. Kosten: vergelijking serieschakeling met PV-wireless

3.11.1. Aanleiding en vraag

Tenslotte is de “winst” van PV-wireless ten opzichte van serieschakeling berekend. Het resultaat van deze fase geeft aan of een nadere ontwikkeling van het concept zinvol is of niet en geeft antwoord op de centrale vraag: zal toepassing van PV-wireless daadwerkelijk leiden tot een substantiële kostenverlaging van PV systemen bij minimaal dezelfde jaaropbrengst als dat van huidige PV-systemen?

3.11.2. Werkzaamheden, werkwijze

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door OKE.

3.11.3. Resultaten

Allereerst zij gewezen op de energetische winst van het toepassen van PV-wireless ten opzichte van serieschakeling (zie onder 3.9), die volgens de uitgevoerde berekeningen en simulaties varieert tussen 5 en 15% (afhankelijk van praktijksituatie).

De tweede vraag is in welke mate een kostenvoordeel kan worden gerealiseerd. Dit voordeel blijkt aanzienlijk. De door het toepassen van PV-wireless “overbodig geworden componenten zijn:

- Maatregelen voor Klasse II isolatie
- Bypass diodes (die in PV-wireless zelfs ongewenst zijn)
- Interne bedrading voor bypass diodes
- Aluminium frame
- Junction box
- High voltage DC-kabels (dubbel geïsoleerd)
- Connectoren
- Blocking diodes
- DC zekeringen
- DC-overspanningsbeveiliging
- DC-isolatiebewaking
- Veiligheidsaarding

De kosten van al deze componenten tezamen – inclusief installatie en draagconstructie, doch exclusief aluminium frame, klasse II isolatie, bypass diodes en bedrading voor bypass diodes - worden geschat op minimaal € 1500 (bron: ECN) per kWp.

Daarvoor in de plaats komen de volgende PV-wireless componenten:

- Modulecontact inclusief connector naar stroombus
- Stroombus

De kosten (verkoop) van een stroombus zullen liggen op € 2040 per kWp bij grote aantallen; de kosten van een modulecontact, inclusief connector op ca. € 1020 per PV-module, dus (uitgaande van PV-modules van 70-80 Watt) op € 140280 per kWp. Resultierend in totale kosten van € 160320 per kWp, een daling van – afgerond – ca. € 1200 per kWp.

Mogelijk doet deze conclusie zeer optimistisch aan, doch nadrukkelijk zij vermeld dat in deze berekening nog niet eens de kostprijzdaling van de PV-module is meegenomen. Immers, bij PV-wireless zijn de klasse II isolatie, bypass diodes, interne bedrading van de bypass diodes en het aluminium frame overbodig geworden.

4. Beoordeling van de resultaten

4.1. Beoordelingsaspecten

De leidende vraag van de haalbaarheidsstudie was: zal toepassing van PV-wireless daadwerkelijk leiden tot een substantiële kostenverlaging van PV systemen bij minimaal dezelfde jaaropbrengst als van huidige PV-systemen? De in de NEO-subsidie-aanvraag geformuleerde beoordelingsaspecten en de resultaten van deze haalbaarheidsstudie zijn weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Overall beoordelingsaspecten

Beoordelingsaspect	Beoogd conform projectaanvraag	Resultaten haalbaarheidsstudie
BOS-kosten	Daling van € 7501125 per kWp	Daling van € 1200 per kWp
PV-modulekosten	Daling van € 50100 per kWp	
Inverterkosten	Geen stijging door hogere eisen omvormer	Geen stijging door hogere eisen omvormer

4.2. Resultaten

Naast de beoordelingsaspecten zijn in de NEO-subsidie-aanvraag tevens per fase beoogde resultaten geformuleerd. Deze zijn in Tabel 4.2 opgenomen, met in de linkerkolom de omschrijving, vervolgens het beoogde resultaat, en in de derde kolom het resultaat gebleken uit de haalbaarheidsstudie. In de vierde kolom is aangegeven op welke punten nader onderzoek / testen is vereist.

Tabel 4.2. Beoordelingsaspecten per fase

Beoogde resultaten	Beoogd conform projectaanvraag	Resultaten haalbaarheidsstudie	Nadere studie vereist inzake
Raadplegen markt	Overzicht eisen en wensen vanuit de PV-markt	Overzicht belangrijkste eisen inzake installatie vanuit de PV-markt is opgenomen in deze rapportage. Meerdere eisen zijn geïnventariseerd en zijn indien gewenst beschikbaar. Liggen ook besloten in verslagen van bijeenkomsten.	Eisen bouw/regelgeving en arbo dienen te worden geïnventariseerd, met name ook samenhang /onderlinge relaties, c.q. afhankelijkheden
Modulecontact	Ontwerptekening. Eis: modulecontact dient mechanische functie aluminium frame over te nemen en te fungeren als "junction box"	Ontwerptekening Voldoet aan eisen	Het modulecontact moet in het veld worden getest; bewezen dient te worden dat elektrische en mechanische integratie mogelijk is. Pas als dat is bevestigd, kan aandacht worden besteed aan het "slimmer" maken van het contact
Verbinding modulecontact-stroombus	Ontwerptekening	Ontwerptekening, voldoet aan elektrische en mechanische eisen	Testen zijn vereist om na te gaan of de verbinding gedurende volledige levensduur "volledig" blijft functioneren.
Materiaal stroombus	Keuze maken, berekening energie-inhoud	Keuze gemaakt voor aluminium, energierugverdiendtijd is	Geen

		acceptabel (2,5 maanden) Tevens keuzes gemaakt voor 2xN stroombussen en horizontale positionering.	
Verbinding tussen stroombus en inverter	Definitie/ontwerp	Voldoende inzicht om verbinding tot stand te brengen. Testen aan prototype uitgevoerd.	Testen verbinding. Redundantie aanbrengen
Omzetter	Verkennen topologieen	Topologieen verkend; omzetting is mogelijk met hoog rendement (97%)	Integreren inverter en omzetter
Normen	Inzicht of concept voldoet aan normen	Inzicht verkregen: voldoet <i>niet</i> aan normen	Aan dit aspect dient veel aandacht te worden besteed in een eventueel vervoltraject. Immers de normen dienen te worden aangepast. Voor een lijst met voorziene acties wordt verwezen naar paragraaf 3.7
Veiligheid	Is concept inherent veilig?	Ja, concept is inherent veilig, alleen zo zal het zeker niet door norminstellingen op basis van vigerende normen worden beoordeeld. Zie punt hiervoor	Zie punt hiervoor
Electrische / energetische aspecten PV-wireless en serieschakeling	Inzicht in verschil electrische / energetische aspecten op basis van berekeningen en simulaties	Inzicht verkregen op basis van groot aantal berekeningen en simulaties.	Formele verificatie van artikel <i>Detailed analysis of currents in PV-shunts</i>
Systeemgrootte	Wat is optimale systeemgrootte	Op basis van gekozen doorsnede stroombus van 120 mm ² , ligt de optimale systeemgrootte tussen 0 en 4 kW. Echter, het concept is geschikt voor elke grootte.	

4.3. Conclusies en afsluiting

Op basis van de beoordelingsaspecten moet zonder meer worden geconcludeerd dat het concept PV-wireless openingen biedt voor substantiële verlaging van de BOS-kosten. Een vervoltraject lijkt derhalve zinvol, mits natuurlijk voldoende projectpartners kunnen worden gevonden die mede geïnteresseerd zijn en dezelfde uitgangspunten hebben als OKE-Services.

Inzake de resultaten van onderhavige haalbaarheidsstudie moet worden geconcludeerd dat de in de NEO-subsidieaanvraag geformuleerde werkzaamheden alle – en zelfs meer dan dat – zijn uitgevoerd.

5. Presentatie op PV for Europe conferentie oktober 2002

5.1. Achtergrond

Hoewel niet voorzien in het NEO-project, werd reeds in een vroeg stadium besloten het concept op de conferentie *PV for Europe*, 7-10 oktober 2002 in Rome te presenteren. OKE dacht oorspronkelijk alleen aan een paper, maar door ECN werd geopperd een stand in te richten met een prototype van het concept. Mede door participatie – naast OKE en ECN – van NKF en Oskomera werd dit mogelijk. Besloten werd te gaan voor “de hoofdprijs”: een opvallende presentatie in een stand van 6 meter breed. In dit hoofdstuk wordt kort verslag gedaan van de presentatie op de PV for Europe conferentie.

5.2. Presentatie in de stand

Gekozen is voor een zo realistisch mogelijke weergave van het concept in een opvallende stand van zes meter breed (zie figuur 5.1). Een heus dak met daarop het PV-wireless concept: de stroombus en de PV-laminaten met elkaar verbonden door middel van de moduleconnectoren. Ook was een dummy inverter geïnstalleerd. Vier posters – uitgevoerd in PV-laminaten – gaven kort en bondig de essentie van het concept weer. Een vijfde poster gaf een impressie van de toekomst en de partners in het project (ECN, NKF, OKE en Oskomera).



Figuur 5.1. PV-wirefree stand op conferentie PV for Europe, 7-10 oktober 2002, Rome

5.3. Paper

Ten behoeve van de PV for Europe conferentie is een paper ingediend (en geaccepteerd) met de titel *PV-wirefree: redesigning and innovating grid-connected PV-systems* (down te loaden vanaf <http://www.pv-wirefree.com>). Co-auteurs van Henk Oldenkamp waren Irene de Jong (OKE) en Wim Sinke (ECN). Ondanks het feit dat was gevraagd om een mondelinge presentatie, werd de paper ingedeeld in een posterpresentatiesessie. Op de poster werd in het kort het concept toegelicht (zie figuur 5.2).

5.4. Informatievoorziening

5.4.1. Flyer

Voor de conferentie is een flyer, waarin de essentie van het concept wordt toegelicht samengesteld (de flyer is down te loaden vanaf <http://www.pv-wirefree.com>). Deze werd alleen uitgereikt (voor zover mogelijk) aan geïnteresseerde bezoekers. In totaal werden ca. 450 flyers tijdens de conferentie uitgereikt.

5.4.2. Website

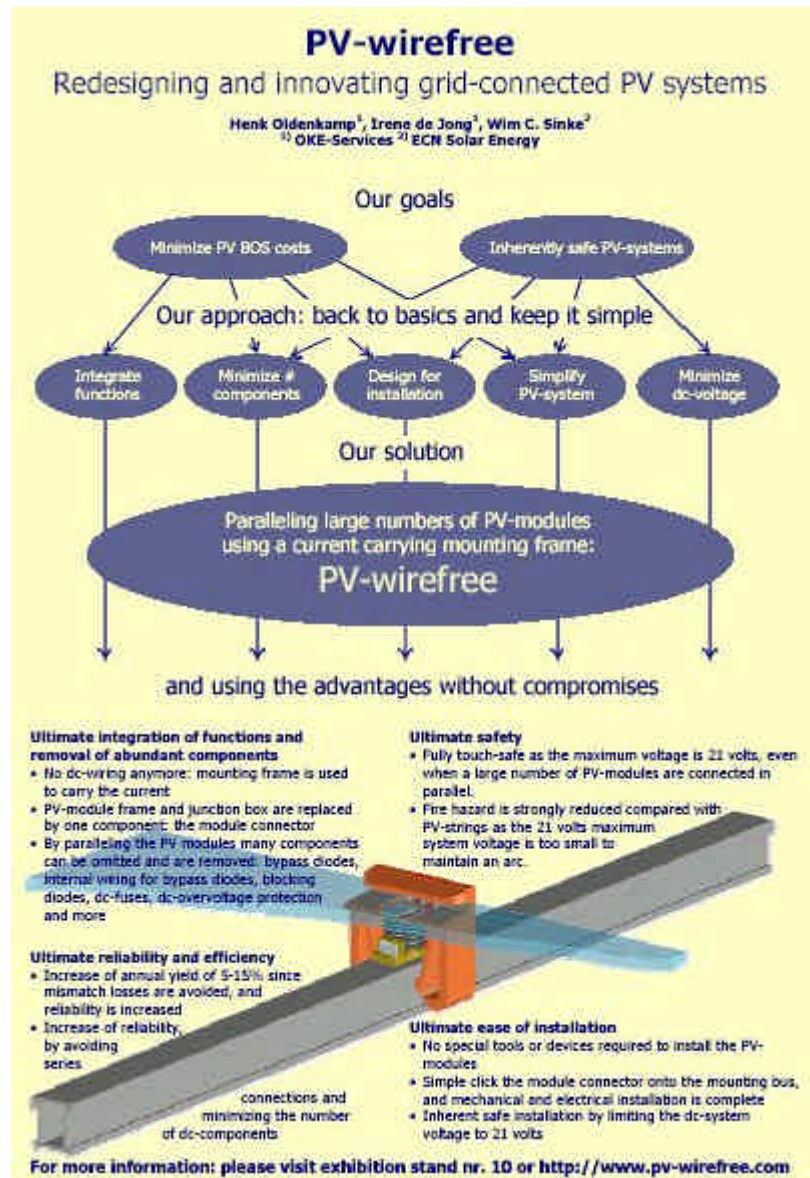
Tevens is per 14 oktober 2002 de PV-wirefree website in de lucht: <http://www.pv-wirefree.com> en <http://www.pv-wirefree.nl>. De website bevat zowel algemene informatie over het concept als technische informatie. Tevens wordt aangegeven dat het concept nog geverifieerd dient te worden door middel van testen en metingen.

Doordat de octrooiaanvraag bij de start van de conferentie nog niet was ingediend, kon de website helaas net niet met de start van de conferentie on-line gaan. Tijdens de conferentie konden bezoekers op de PV-wirefree de website bekijken op de aldaar aanwezige laptop.

5.5. Respons

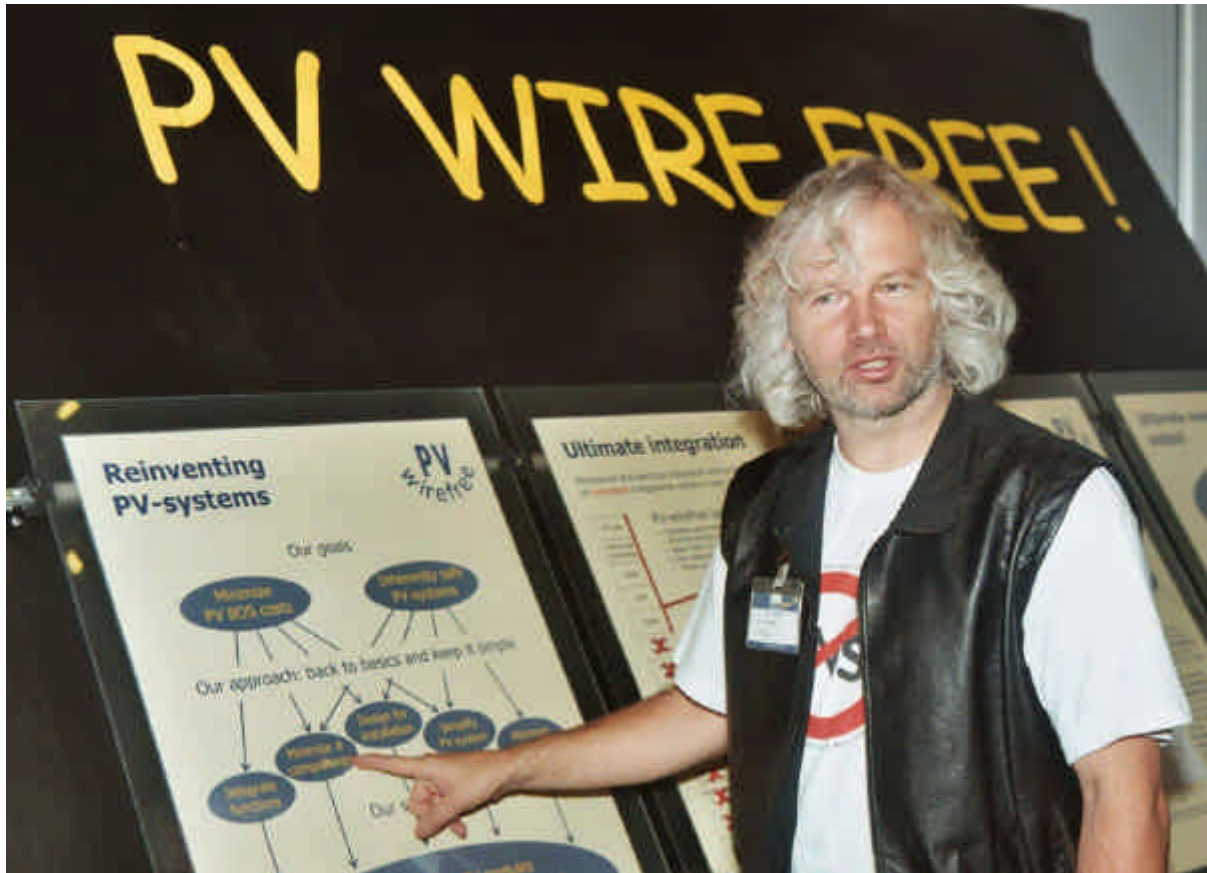
De respons tijdens de conferentie was overweldigend en vooral zeer positief. Vele bezoekers van de stand vonden het concept het "enige innovatieve" op de conferentie. Enkele honderden bezoekers van de stand gaven aan dat zij op de hoogte wensden te worden gehouden over nieuwe ontwikkelingen. Dat betekent dat zij op een mailing list worden opgenomen en bij nieuwe ontwikkelingen een email krijgen toegezonden (PV-wirefree news service).

Een belangrijke vraag – en mede doelstelling van de presentatie op de PV for Europe conferentie – was na te gaan of PV-fabrikanten geïnteresseerd zouden zijn: zouden zij bereid zijn deze speciale PV-wireless laminaten te gaan maken? De reacties van vertegenwoordigers van PV-fabrikanten geven aan dat we in deze optimistisch kunnen zijn. Relatief kleine PV-fabrikanten – als Evergreen en Astropower – waren zelfs zo enthousiast dat ze direct betrokken wilden worden bij verdere ontwikkeling. Astropower bood aan de door hun te maken speciale PV-laminaten tezamen met de moduleconnector in de klimaatkast te testen.



Figuur 5.2. Poster PV for Europe conferentie, 7-10 oktober 2002, Rome

Belangrijker was echter hoe de “grote” PV-fabrikanten tegenover het concept staan. Ook zij toonden interesse en waren geïnteresseerd. BP-Solar heeft toegezegd bereid te zijn te verklaren dat zij de PV-wireless-laminaten zullen gaan produceren als wij kunnen bewijzen dat “het werkt”. Het voorgestelde “proof-of-principle” DEN-project lijkt derhalve de juiste weg om het project voort te zetten.



Figuur 5.3. Henk Oldenkamp – bedenker van het PV-wirefree concept - in de PV-wirefree stand tijdens de PV for Europe conferentie, 7-10 oktober 2002, Rome