

# Zon volgen en beschaduwing bij HCPV-GO

Marc van der Sluys

Paul van Kan, Herold Cremer, Jurgen Reintjes, Zhihao Wu

Lectoraat Duurzame Energie  
Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

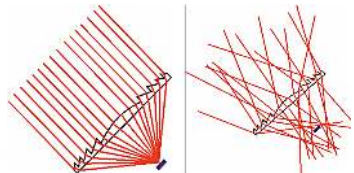
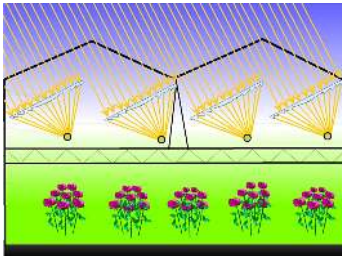
Onderzoeksmiddag HAN, november 2015

- 1 Inleiding: HCPV-GO
- 2 SolTrack: een zonnevolgroutine
  - Nauwkeurigheid en verlies van vermogen
  - Refractie in de aardatmosfeer
  - De SolTrack-routine
  - Nauwkeurigheid SolTrack
  - Van SolTrack naar SolTraQ
- 3 Onderlinge beschaduwning door de HCPV-GO-units
  - Ontwerp HCPV-GO-units
  - Model en opstelling van HCPV-GO-units
  - Inkomende zonnestraling en beschaduwning
  - Voorbeelden zomer, winter en jaarlijks
  - Conclusies en toekomst

- 1 Inleiding: HCPV-GO
- 2 SolTrack: een zonnevolgroutine
  - Nauwkeurigheid en verlies van vermogen
  - Refractie in de aardatmosfeer
  - De SolTrack-routine
  - Nauwkeurigheid SolTrack
  - Van SolTrack naar SolTraQ
- 3 Onderlinge beschaduwning door de HCPV-GO-units
  - Ontwerp HCPV-GO-units
  - Model en opstelling van HCPV-GO-units
  - Inkomende zonnestraling en beschaduwning
  - Voorbeelden zomer, winter en jaarlijks
  - Conclusies en toekomst

## HooggeConcentreerde PV zonne-energie voor de Gebouwde Omgeving

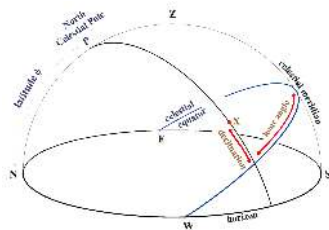
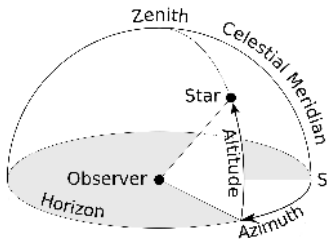
- Gebruik een lens om direct zonlicht op een moderne zonnecel te projecteren
- Diffuus licht blijft over voor verlichting
- Toepassingen: kassen, lichtstraten, winkelcentra, *etc.*
- Maar: moet volgen!



- 1 Inleiding: HCPV-GO
- 2 SolTrack: een zonnevolgroutine
  - Nauwkeurigheid en verlies van vermogen
  - Refractie in de aardatmosfeer
  - De SolTrack-routine
  - Nauwkeurigheid SolTrack
  - Van SolTrack naar SolTraQ
- 3 Onderlinge beschaduwning door de HCPV-GO-units
  - Ontwerp HCPV-GO-units
  - Model en opstelling van HCPV-GO-units
  - Inkomende zonnestraling en beschaduwning
  - Voorbeelden zomer, winter en jaarlijks
  - Conclusies en toekomst

## Eisen:

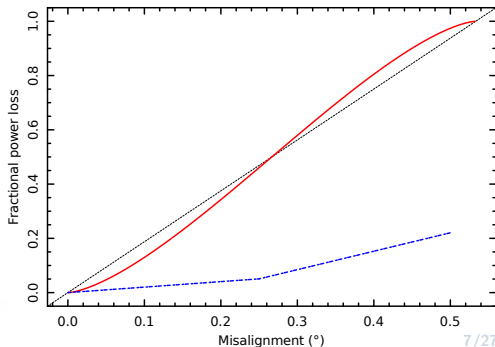
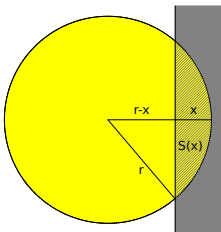
- Nauwkeurig ( $\lesssim 0,01^\circ$ )
- Snel (voor microcontroller)
- Voor elke locatie op Aarde
- Voor elk moment (dagelijkse, jaarlijkse beweging)
- Positie in azimuthale en parallactische coördinaten



- Onnauwkeurig richten leidt tot verlies in vermogen:

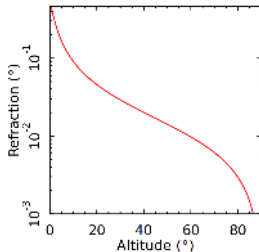
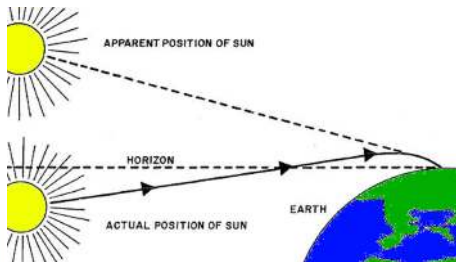
$$S(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{x-r}{r} \right) + \left( \frac{x-r}{r} \right) \sqrt{\frac{x}{r} \left( 2 - \frac{x}{r} \right)} \right]$$

- $x = 0,01^\circ \rightarrow S(x) = 0,4\%$
- $x = 0,10^\circ \rightarrow S(x) = 13\%$



## Refractie in de aardatmosfeer:

- $\sim 0,5^\circ$  bij zonsopkomst en zonsondergang
- $0^\circ$  in het zenit
- Gemiddeld in Nederland:  $\sim 0,07^\circ$





## Schrijven van de SolTrack-routine:

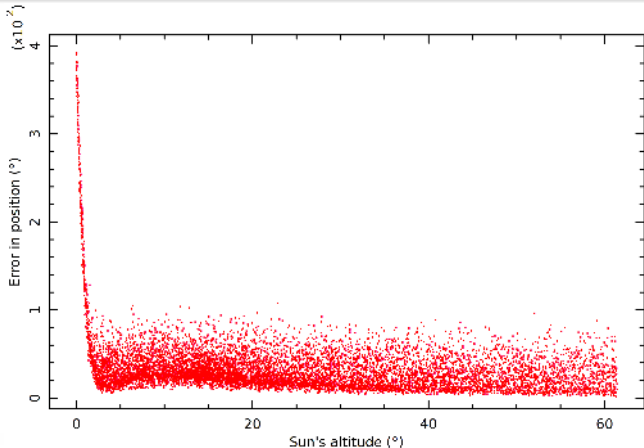
- Gebaseerd op libTheSky
- Correctie voor refractie in de atmosfeer
- Conversie naar horizontale, parallactische en cardanische coördinaten
- Opkomst en ondergang van de Zon
- <http://soltrack.sf.net>

## Testen van de routine:

- 100.000 willekeurige data en tijdstippen:
  - 2014 – 2113
  - Zon boven de horizon
  - azimuthale en parallactische coördinaten
- Vergelijk met nauwkeurige routines voor:
  - positie: VSOP 87 ( $\sim 10^{-6^\circ}$ )
  - refractie (numerieke integratie)

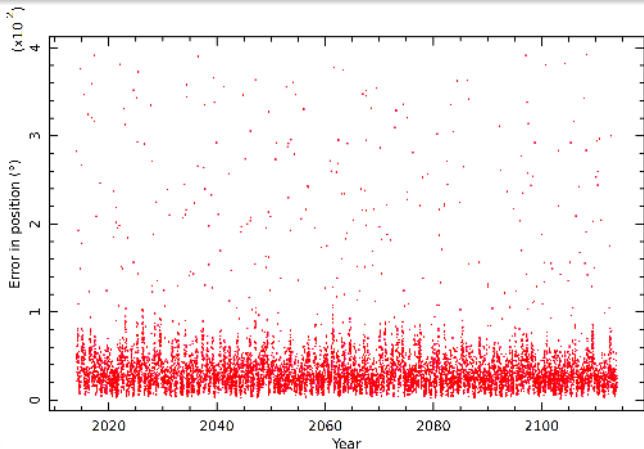
## Resultaat:

- Nauwkeurigheid:  $0,0036 \pm 0,0038^\circ$
- Verlies vermogen: 0,095%



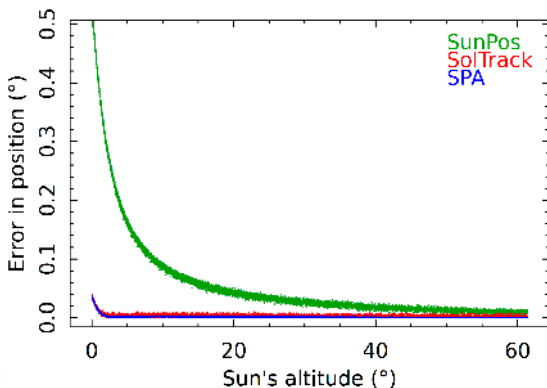
## Resultaat:

- Nauwkeurigheid:  $0,0036 \pm 0,0038^\circ$
- Verlies vermogen: 0,095%



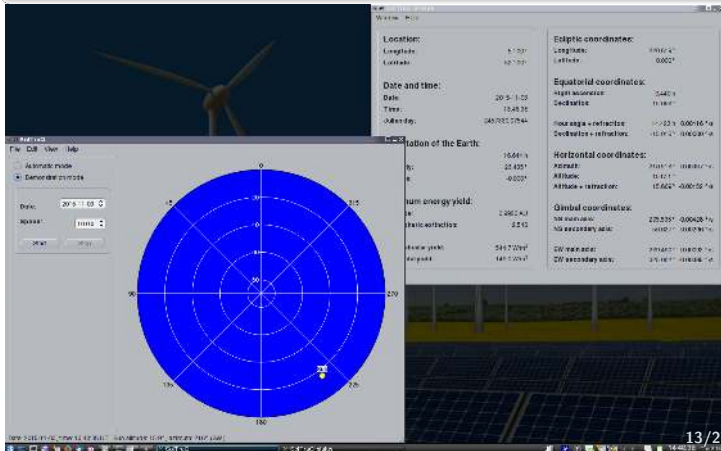
### Resultaat:

		SunPos	SPA	SolTrack
<b>Accuracy</b>	abs.	$0.073 \pm 0.091^\circ$	$0.0023 \pm 0.0037^\circ$	$0.0036 \pm 0.0038^\circ$
	rel.	$19.7\times$	$0.62\times$	$1.00\times$
<b>Power loss</b>		8.2%	0.048%	0.095%
<b>CPU time</b>	rel.	$1.11\times$	$7.13\times$	$1.00\times$



## Semi-handmatige aansturing

- Aansturing vanaf PC
- GUI m.b.v. Qt
- Demo-mode voor slecht weer



**Location:**  
Longitude: 51.53°  
Latitude: 52.53°

**Date and time:**  
Date: 20-5-11 03  
Time: 15:48:38  
J-Money: 249700.07544

**Ecliptic coordinates:**  
Longitude: 0.000°  
Latitude: 0.000°

**Equatorial coordinates:**  
Right ascension: 3.440 h  
Declination: 15.188°

**Hour angle + refraction:** 11.23 h -0.0016 h  
**Declination + refraction:** 15.187° -0.0028°

**Horizontal coordinates:**  
Azimuth: 318.81° -0.0016 h  
Altitude: 15.171°  
Altitude + refraction: 15.162° -0.0025 h

**Orbital coordinates:**  
RA secondary axis: 275.235° -0.0042 h  
DA secondary axis: 16.000° -0.0000 h  
CW main axis: 319.847° -0.0016 h  
CW secondary axis: 15.161° -0.0026 h

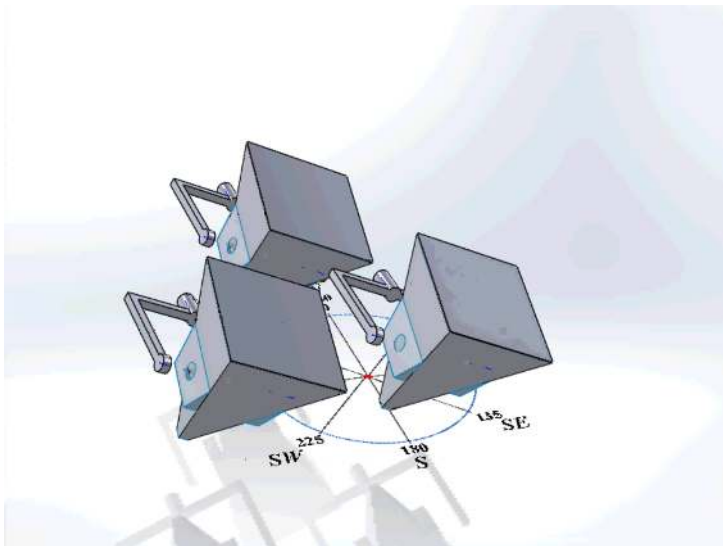
**Position of the Earth:**  
Longitude: 15.66 h  
Latitude: 22.835°  
Altitude: -0.000°

**sum energy yield:**  
kW: 2.862 kW  
kWh: 2.240

**hourly yield:** 549.720 kWh  
**average:** 141.075 kWh

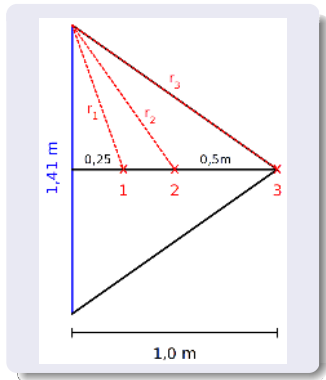
- 1 Inleiding: HCPV-GO
- 2 SolTrack: een zonnevolgroutine
  - Nauwkeurigheid en verlies van vermogen
  - Refractie in de aardatmosfeer
  - De SolTrack-routine
  - Nauwkeurigheid SolTrack
  - Van SolTrack naar SolTraQ
- 3 Onderlinge beschaduwning door de HCPV-GO-units
  - Ontwerp HCPV-GO-units
  - Model en opstelling van HCPV-GO-units
  - Inkomende zonnestraling en beschaduwning
  - Voorbeelden zomer, winter en jaarlijks
  - Conclusies en toekomst

# Ontwerp HCPV-GO-units



## Aannames:

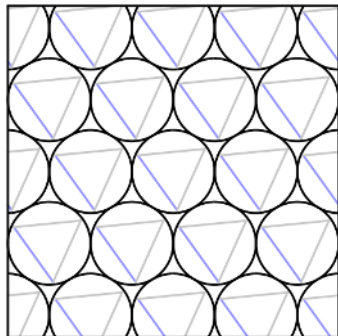
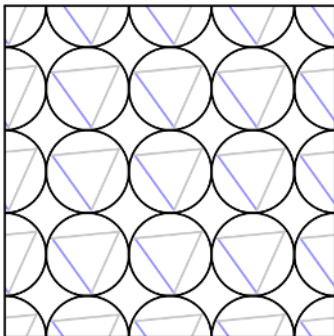
- Lens:  $1 \times 1$  m
- Diepte: 1 m
- Rotatiepunt: optimaal voor kleinste draaicirkel:
  - #1  $\rightarrow r_1 = 0.75$  m; buffer: 0,1 m
  - tussen units:  $d = 2r_i + b = 1,6$  m
- Verwaarloos afmetingen zonnecel
- Units in plat vlak





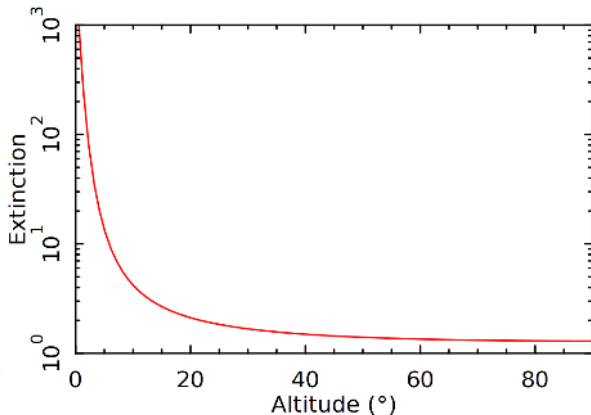
## 2D patroon voor draaicirkels

- Rechthoekig
- 'Honingraat'
  - Rijen factor  $\sqrt{3}/2$  dichter op elkaar
  - 15% meer energie-opwekking per  $m^2$  (maar: schaduw!)
  - 13% minder doorvallend direct zonlicht per  $m^2$



## Zonnestraling aan het aardoppervlak:

- Zonneconstante ( $\sim 1361,5 \text{ W/m}^2$ )
- Afstand Aarde–Zon ( $\pm \sim 4\%$ )
- Extinctie in de atmosfeer vs. hoogte



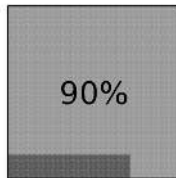
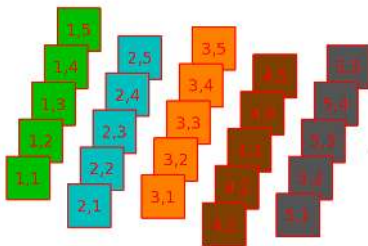
## Onderlinge beschaduwing door HCPV-GO units:

- 'Bekijk' lenzen vanuit de positie van de Zon
- Wanneer lenzen overlappen is er sprake van beschaduwing

$$R = R_y(-h) R_z(-A)$$
$$= \begin{pmatrix} \cos h \cos A & -\cos h \sin A & \sin h \\ -\sin h \cos A & \sin h \sin A & \cos h \\ \sin A & \cos A & 0 \end{pmatrix}$$

## Veldje HCPV-GO units op 21 juni, 17:24 uur:

- Geen beschaduwing;  $\sim 977 \text{ W/m}^2$  voor PV
- Dagelijks 86% voor PV ( $10,0 \text{ kWh/m}^2$  bij 100% Zon)
- Dagelijks 36% (max. 48%) direct licht op de grond

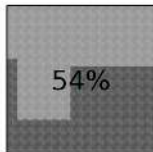


Date: 2014-06-21, time: 17:24, Sun:  $39^\circ$ , WSW  
Solar power: PV: 58%, ground: 36%, lost: 6%  
total:  $877 \text{ W/m}^2$ , PV:  $789 \text{ W/m}^2$ , ground:  $199 \text{ W/m}^2$

90%

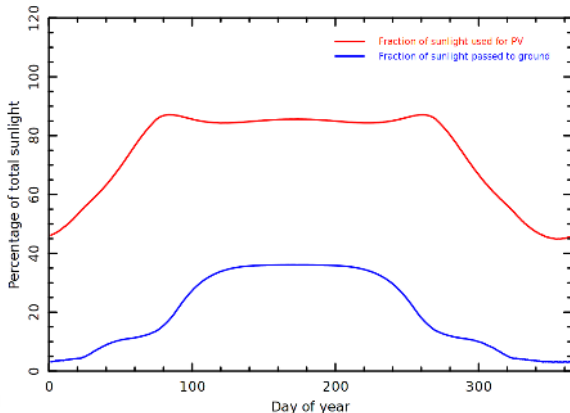
### Veldje HCPV-GO units op 21 december, 12:00 uur:

- Veel beschaduwing;  $\sim 267 \text{ W/m}^2$  voor PV
- Dagelijks 45% voor PV (1,1 kWh/m<sup>2</sup> bij 100% Zon)
- Dagelijks 3% direct licht op de grond

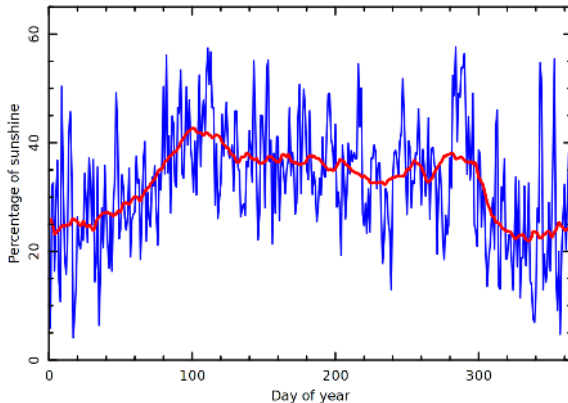


Date: 2014-12-21, time: 12:00, Sun: 14°, S  
Solar power: PV: 53%, ground: 1%, lost: 46%  
total: 499, PV: 267, ground: 1 W/m<sup>2</sup>

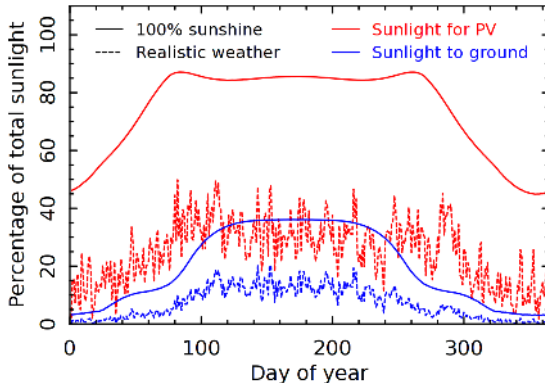
- Bij volledige Zon: 2700 kWh/m<sup>2</sup> zonlicht beschikbaar
  - 2163 kWh/m<sup>2</sup> (80%) voor PV
  - 439 kWh/m<sup>2</sup> (25%) wordt doorgelaten



- 2002–2011, iedere 10 minuten
- Percentage zonneshijn afgeleid uit stralingsmetingen
- Gebruik gemiddelde over 10 jaar, voor ieder 10-min slot

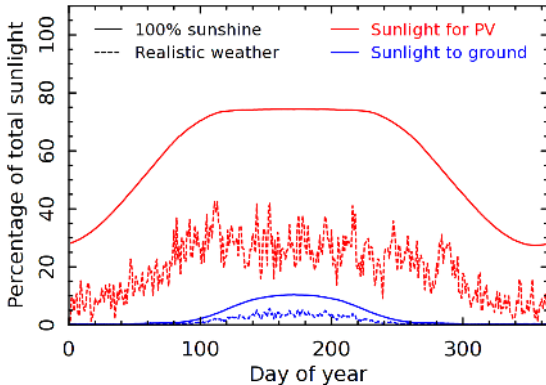


- Realistisch weer: 939 kWh/m<sup>2</sup> zonlicht (35%)
  - 767 kWh/m<sup>2</sup> (28%) voor PV
  - 161 kWh/m<sup>2</sup> (9%) wordt doorgelaten



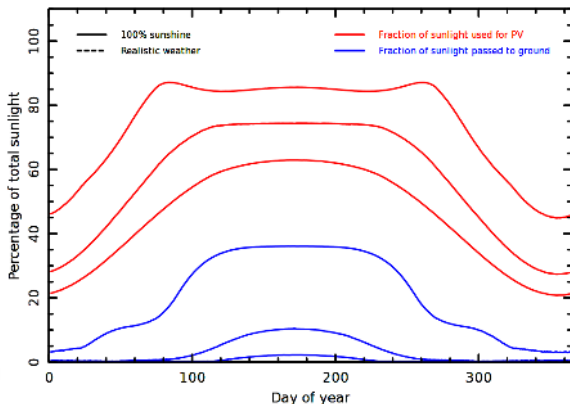


- Afstand tussen units: 1.23m (kunnen elkaar raken)
  - 1746/624 kWh/m<sup>2</sup> (65/23%) voor PV
  - 82/30 kWh/m<sup>2</sup> (4.6/1.7%) wordt doorgelaten



## Vergelijken grids:

Afst.	PV/m <sup>2</sup>	PV	Grond	Raken?	Kost/m <sup>2</sup>
1.60m	767 kWh	80%	25%	Nee	100%
1.23m	624 kWh	65%	4.6%	Kan	171%
1.00m	501 kWh	52%	0.9%	Steeds	222%



## Conclusies:

- Nauwkeurige volginrichting HCPV-GO
  - SolTrack: <http://soltrack.sf.net>
  - Eerste prototype is gebouwd, draait en wordt getest
- Modellen HCPV-GO
  - 's Zomers veel PV en veel direct zonlicht op de grond
  - 's Winters weinig PV en direct zonlicht op de grond

## Volgende stappen:

- Open loop → closed loop
- Corrigeren voor imperfecte installatie
- Energieconversie meewegen voor absolute opbrengst
- Hoe efficiënt is HCPV-GO?
  - HCPV-GO in andere klimaten?