

Projekt:  
CPV-Systeme mit hocheffizienten und  
installationsfreundlichen Modulen (CPV Magnus)

Förderkennzeichen: 0325485C

## AP 4 – Tracker-Design Abschlussbericht

Kirchner Solar Group GmbH

Auf der Welle 8

36211 Alheim Heinebach

T: +49 5664 93911-0

[www.kirchner-solar-group.de](http://www.kirchner-solar-group.de)

Autor: Dipl. Phys. Karin Gernhardt

Januar 2016

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325485C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

The logo for Projektträger Jülich, consisting of the letters 'PTJ' in a large, bold, blue font. Below it, the text 'Projektträger Jülich' and 'Forschungszentrum Jülich' is written in a smaller blue font.

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich



## Inhaltsverzeichnis

1	Inhalt und Zielsetzung .....	7
1.1.	Aufgabenbeschreibung des Gesamtprojektvorhabens laut Vorhabenbeschreibung .....	7
1.2.	Einführung.....	8
2	AP4: Trackerdesign.....	10
2.1.	Technischer Stand zu Projektbeginn .....	10
3	AP 4.1: Design der Tracker – Struktur .....	12
3.1.	Einleitung .....	12
3.2.	Fragestellung und Zielsetzung .....	13
3.3.	Beschreibung der wichtigsten Randparameter .....	13
3.3.1.	Größe der Modulfläche .....	13
3.3.2.	Trackinggenauigkeit.....	13
3.3.3.	Verfahrgeschwindigkeit und -genauigkeit (Azimut und Elevation).....	15
3.3.4.	Installationsort.....	16
3.3.5.	Umgebungsbedingungen.....	16
3.3.6.	Gesetze, Normen, Richtlinien .....	17
3.4.	Auswahl der Tracker Geometrie .....	17
3.5.	Evaluierung der Konstruktionsvarianten .....	18
3.6.	Sensitivitätsanalyse .....	20
3.6.1.	Ergebnisse.....	25
3.7.	Konstruktionsentwurf .....	27
4	AP 4.2 und 4.3 : Antriebs- und Anschlussauslegung.....	29
5	AP 4.4 und 4.5: Ansteuerung und Trackingalgorithmus .....	32
5.1.	Sicherheitsfunktionen .....	32
5.2.	Hybridsteuerung und Trackingalgorithmus .....	35
6	AP 4.6: Verteilung der Kräfte zwischen Modul und Tracker.....	36
7	Verifikation Tracker-Geometrie incl. Antriebskomponenten .....	36
7.1.	Bauteile Prüfung .....	37
7.1.1.	Tragarme .....	37
7.1.2.	Tragrohre .....	39
7.1.3.	Evaluierung von Passgenauigkeit und Montagefreundlichkeit .....	39
7.1.4.	Moduljustage.....	42
8	Verifikation Hybridsteuerung und Trackingalgorithmus.....	44
9	AP 4.7 und 4.8: Optimierung des Materialeinsatzes und Massenfertigungstauglichkeit.....	57
10	Fazit .....	59

## Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: Nachführung in Azimut .....	10
Fig. 2: Nachführung in Elevation.....	11
Fig. 3: Modulstellungen .....	12
Fig. 4: Fehlwinkel der Modulfläche zur Sonneneinstrahlung .....	12
Fig. 5: Trackinggenauigkeit .....	14
Fig. 6: Schnittdarstellung einer idealen und gebogenen Modulfläche .....	14
Fig. 7: Modulstellungen .....	15
Fig. 8: Hemisphären.....	16
Fig. 9: Nachführbereich in Azimut für Hemisphären.....	16
Fig. 10: Hauptbaugruppen.....	18
Fig. 11: Mast Varianten .....	18
Fig. 12: Drehkopf Varianten 1.....	19
Fig. 13: Drehkopf Varianten 2.....	19
Fig. 14: Drehkopf Variante 3 mit Dual-axis drive.....	19
Fig. 15: Tragkonstruktionen.....	19
Fig. 16: Mögliche Anbindung an das Tragrohr.....	19
Fig. 17: Lastfälle .....	21
Fig. 18: Resultierende Windkraft nach unten= + $c_f$ = Druck .....	22
Fig. 19: Resultierende Windkraft nach oben= - $c_f$ = Sog.....	22
Fig. 20: Modulflächengröße - Akzeptanzwinkel .....	22
Fig. 21: Beispiel FEM Analyse Lastfall 1, Verschiebungen in der Tragkonstruktion, $A = 122 \text{ m}^2$ , Akzeptanzwinkel $0,2^\circ$ .....	23
Fig. 22: Beispiel FEM Analyse Lastfall 1, Verschiebungen in den Modulen, $A = 122 \text{ m}^2$ , Akzeptanzwinkel $0,2^\circ$ .....	23
Fig. 23: Beispiel FEM Analyse Lastfall 2, Verschiebungen in den Modulen, $A = 122 \text{ m}^2$ , Akzeptanzwinkel $0,2^\circ$ .....	24
Fig. 24: Beispiel FEM Analyse Lastfall 4, Verschiebungen in den Modulen, $A = 122 \text{ m}^2$ , Akzeptanzwinkel $0,2^\circ$ .....	24
Fig. 25: Beispiel FEM Analyse Lastfall 6, Verschiebungen in den Modulen, $A = 122 \text{ m}^2$ , Akzeptanzwinkel $0,2^\circ$ .....	25
Fig. 26: Gewicht Stahlbau in Abhängigkeit des Akzeptanzwinkels.....	25
Fig. 27: Sensitivitätsanalyse.....	26
Fig. 28: Übersichtszeichnung.....	27
Fig. 29: Mast .....	27
Fig. 30: Tragrohr .....	28

Fig. 31: Tragarme.....	28
Fig. 32: M-P- Diagramm für Nennbetriebsart S9.....	29
Fig. 33: Nachführsystem mit Bezugssystem.....	30
Fig. 34: Dual-Axis drive, Schnittzeichnungen .....	31
Fig. 35: Dual-Axis drive mit Motor-Getriebe Einheiten.....	31
Fig. 36: Sicherheitsfunktionen.....	33
Fig. 37: Überwachte Parameter, Auszug.....	34
Fig. 38: Hytrack und Steuerung SolTrk am Testtracker .....	35
Fig. 39: Ausrichten des Hytracks .....	35
Fig. 40: Modulmontage mittels Vakuumheber .....	36
Fig. 41: Ausschnitt aus der Musterstatik.....	37
Fig. 42: Flexible Positionierung der Tragarme auf dem Tragrohr .....	38
Fig. 43: Vorrichtung mit Tragrohrstummel .....	38
Fig. 44: Versuchsablauf .....	38
Fig. 45: Verdrehung Tragarm auf Tragrohr .....	38
Fig. 46: Auszug aus Erstmusterprüfbericht .....	39
Fig. 47: Durchbiegung Tragrohre.....	39
Fig. 48: Zugvorrichtung .....	39
Fig. 49: Setzen des Masts .....	40
Fig. 50: Mast in Waage ausrichten.....	40
Fig. 51: Tragrohr montieren .....	40
Fig. 52: Tragrohr ausrichten .....	40
Fig. 53: Tragarmmontage 1. Versuch .....	41
Fig. 54: Tragarmmontage, 2. Versuch .....	41
Fig. 55: Tragarmausrichtung mittels Rotationslasers.....	42
Fig. 56: Geteilte Tragarme mit aufgeschweißten Tragarmadapter und Tragarm .....	42
Fig. 57: Testtracker.....	43
Fig. 58: Installierte Messinstrumente am Tracker .....	44
Fig. 59: Hytrack und Steuerung SolTrk am Testtracker .....	45
Fig. 60: Messreihe Trac-Stat.....	46
Fig. 61: Positionen der Solar MEMS und Auswerteverfahren.....	47
Fig. 62: Direkte Sonneneinstrahlung DNI, erfasst am 02.06.2015 .....	49
Fig. 63: Windgeschwindigkeiten, erfasst am 02.06.2015.....	50
Fig. 64: Fehlwinkel in Azimut, erfasst am 02.06.2015.....	51
Fig. 65: Fehlwinkel in Azimut, erfasst am 02.06.2015.....	52



Fig. 66: Fehlwinkel in Elevation erfasst am 02.06.2015 .....	53
Fig. 67: Fehlwinkel in Elevation, erfasst am 02.06.2015 .....	54
Fig. 68: Fehlwinkel Solar MEMS.....	55
Fig. 69: Bahngeschwindigkeit der Sonne – Nachführgeschwindigkeit in Azimut, äquaturnaher Standort .....	56
Fig. 70: Gewicht Stahlbau in Abhängigkeit des Akzeptanzwinkels.....	57
Fig. 71: Geteilte Tragarme mit aufgeschweißten Tragarmadapter und Tragarm .....	58

# 1 Inhalt und Zielsetzung

Der folgende Bericht beschreibt die durchgeführten Arbeiten und den Stand am Ende des Projektes „CPV Magnus“. Die Arbeiten wurden im Zeitraum vom 1.7.2012 bis 31.7.2015 durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet nur die von der Kirchner Solar Group GmbH durchgeführten Arbeiten im Arbeitspaket AP4.

## 1.1. Aufgabenbeschreibung des Gesamtprojektvorhabens laut Vorhabenbeschreibung

Die Konzentratoren-Photovoltaik (CPV) macht sich Halbleitermaterialersparnis durch den Einsatz eines optischen Konzentratoren und höchste Systemwirkungsgrade durch den Einsatz von Multijunction-Solarzellen zunutze, um kostengünstige Stromerzeugung im Sonnengürtel der Erde zu ermöglichen. Das Kostenreduktionspotential dieser Technologie ist groß, aber bei weitem noch nicht ausgeschöpft, da sich die Technologie erst im Markteintritt befindet.

Ziel des Verbundes ist die Entwicklung eines deutlich kostenreduzierten CPV Systems mit einer zweistufigen Optik, bei dem die vertikale Wertschöpfungskette durch die deutsche Industrie abgedeckt werden kann. Die Industriepartner Fresnel Optics, Soitec Solar und Kirchner Solar Group decken die vertikale Kette Konzentratoren-, Modul- und Trackerherstellung vollständig ab. Unterstützt werden sie hierbei durch die Forschungspartner Fraunhofer ISE und Fachhochschule Kiel.

Das Projekt umfasst vier Themenschwerpunkte:

- 1.) Entwicklung eines neuen CPV Systems mit einer zweistufigen Optik nach dem Köhlerprinzip.**  
Aus einem integralen Ansatz heraus wird ein CPV System kostenoptimiert entwickelt, wobei von Anfang an die Wechselwirkung zwischen Optik-, Modul- und Trackerdesign betrachtet und eine globale Optimierung der Kosten vorgenommen wird.
- 2.) Steigerung der Effizienz und des Ertrages.** Neben der Effizienz eines Systems hat der spezifische Jahresertrag eine ebenso große Rolle für die Wirtschaftlichkeit. Durch die Einführung der zweistufigen Optik sollen sowohl Ertrag, als auch Effizienz des Systems erhöht werden. Zur Effizienzsteigerung werden maßgeblich Arbeiten zur Fresnellinsenherstellung durchgeführt. (Verkürzung der Werkzeugherstellung durch neue Charakterisierungsmethoden für die Zwischenwerkzeuge, Kostenoptimierung des Abformprozesses, kleinere Streuung der Linsenqualität).
- 3.) Entwicklung neuer Aufbautechniken für die Solarzellenmontage.** Die Sintertechnik bietet ein großes Potential zur Verbesserung der thermischen Anbindung der Solarzelle, sowie deren Belastbarkeit hinsichtlich Temperaturzyklen. Die Anwendbarkeit der Sintertechnik auf die Montage von III-V Mehrfachsolarzellen wird in grundlegenden Untersuchungen an der Uni Kiel geprüft.
- 4.) Entwicklung geeigneter Qualitätssicherungsprozesse.** Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist ein Modulkonzept, das auf einem Verbundrahmen aufbaut, unerlässlich. Da die bisher verwendeten Methoden hierfür nicht mehr nutzbar sind, müssen Qualitätssicherungsmethoden (insbesondere die Leistungsbestimmung) entwickelt werden, die z.B. auf der Kombination verschiedener Messmethoden beruhen.

Die erzielten Ergebnisse können bei Erfolg sofort von den Partnern Fresnel Optics, Kirchner Solar Group GmbH und Soitec am Markt verwendet werden und sichern die technologische Führerschaft und damit hochqualifizierte Arbeitsplätze in Deutschland.

## 1.2. Einführung

Die Wettbewerbssituation in der Photovoltaik ändert sich seit Ende 2008 grundlegend. Bis dahin sorgten einige Märkte wie Deutschland und Spanien mit im Vergleich zu heute hohen Einspeisetarifen bei noch geringen weltweiten Fertigungskapazitäten für schnelles Wachstum und hohe Investitionsbereitschaft bei guten Margen. Derzeit gibt es ein Überangebot an Fertigungskapazität und die deutschen und europäischen Photovoltaikhersteller haben Schwierigkeiten, im Wettbewerb mit den asiatischen Firmen zu bestehen. Bei drastisch fallenden Modulpreisen wird auch der Markteintritt neuer Technologien wie zum Beispiel der Konzentration-Photovoltaik (concentrating photovoltaics => CPV-) erschwert. Die Konzentration-Photovoltaikbranche konnte in diesem schwierigen Umfeld dennoch den Markteintritt erzielen und befindet sich gerade im Übergang von Demonstrationskraftwerken bis zu 1 MW Größe hin zu Multimegawatt großen Kraftwerken. Eine wichtige Voraussetzung für diese Entwicklung waren sehr gute Ertragsdaten auf Kraftwerksebene, die jetzt von mehr als 3 Jahren vorliegen.

Die Konzentration-Photovoltaik ist für Kraftwerksanwendungen im Sonnengürtel der Erde hochgradig interessant, da sie mehrere Vorteile, wie sehr hohe Systemeffizienz (derzeit ca. 25%), niedrige Verluste bei hohen Umgebungstemperaturen und ein gutes Stromgenerationsprofil über den Tag, aufweist. Weltweit gibt es in den Gebieten mit hoher direkter solarer Einstrahlung eine sehr gute Korrelation zwischen Wirtschaftswachstum und dem Bedarf an solaren Kraftwerken. Er eröffnet sich daher für die Konzentration-Photovoltaik eine gute Chance Technologielieferant für einen erheblichen Teil solarer Kraftwerksleistung zu werden. Insbesondere der hohe Systemwirkungsgrad ist der Garant für mittel- und langfristig niedrigste Stromgestehungskosten, da die Kosten der eingesetzten Materialien Glas, Stahl und Kupfer entscheidend sein werden.

Soitec Solar (früher Concentrix Solar) ist einer der drei führenden CPV Systemhersteller weltweit. Diese Position ist ein Ergebnis der öffentlich geförderten Vorarbeiten des Fraunhofer-Instituts für solare Energiesystem ISE und der hervorragenden Kooperation mit den deutschen Industriepartnern im Bereich der Optik, der Solarzellen, der Tracker und Wechselrichter. Bereits in der frühen Phase der Entwicklung der CPV Technologie standen bei Soitec Solar Systemzuverlässigkeit und hohe Effizienz im Vordergrund. Hinsichtlich der Möglichkeiten der Kostenreduktion mussten erst die notwendigen Produktions- und Felderfahrungen gesammelt werden. Diese liegen jetzt vor, so dass auf deren Basis neue Modulgenerationen mit erheblich besserer Kosteneffizienz entwickelt werden können.

Am 03. August 2011 wurde vom Bundeskabinett das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieforschung“ verabschiedet. In der daraus abgeleiteten Förderbekanntmachung vom 13.12.2011 wird unter Abschnitt 3.2 die Photovoltaik behandelt.

Dort wird ausgewiesen, dass die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Photovoltaik auf die Schließung der Lücke zwischen Labor- und Produktionswirkungsgraden, Kostensenkung durch effizientere und neue Produktionsverfahren, Reduktion des Materialeinsatzes durch neue Materialien und Materialkombinati-

onen und die weitere Erhöhung der Komponentenlebensdauer ausgerichtet sein soll. Übergeordnetes Ziel ist dabei speziell im Bereich der konzentrierenden Photovoltaik die Kostensenkung bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung.

Genau diesen genannten Zielen ist dieses Projekt zuzuordnen. Durch die Entwicklung eines neuen CPV Systems mit refraktiver Sekundäroptik ist eine Reduktion des eingesetzten Materials möglich. Insbesondere durch den Verbund von System –und Komponentenlieferanten sowie Forschungspartnern wird eine globale Optimierung des Systems möglich, mit der die Kosten gesenkt und der Wirkungsgrad gesteigert werden kann. Weiterhin zielt dieses Projekt darauf ab, mittel- und langfristig die Energieversorgung mittels Photovoltaik kostengünstig zu ermöglichen und damit die CO<sub>2</sub>-Belastung zu reduzieren. Das Projekt wird ebenso die internationale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der konzentrierenden Photovoltaik erhöhen und durch die High-Tech Entwicklung bei den im Projekt involvierten Firmen den Standort Deutschland stärken bzw. die Exportchancen deutlich ausbauen.

Die Kirchner Solar Group GmbH zählt zu den Pionieren in der Solarbranche und hat sich seit ihrer Firmengründung als Elektro Kirchner GmbH im Jahr 1991 und einer späteren Verschmelzung mit der sonnen\_systeme Projektgesellschaft mbH zu einem der führenden Anbieter innerhalb der erneuerbaren Energien etabliert. Heute bietet die Kirchner Solar Group GmbH ein breitgefächertes Produktportfolio mit der Projektierung und Realisierung von PV-Anlagen, von netzunabhängigen Offgrid-Lösungen, zweiachsigen Nachführsystemen und dem Handel mit hochqualitativen Photovoltaik-Komponenten an. Abgerundet wird dieses Angebot durch Bürgerbeteiligungskonzepte, personalisierte Solaranlagen und einem umfassenden Servicekonzept.

Im Unternehmen werden kontinuierlich neue und bestehende Produkte, wie die netzunabhängigen Offgrid-System und das Nachführsystem weiterentwickelt. Grundlage dafür sind neben der hausinternen Entwicklungs- und Produktionskompetenz auch die Erfahrungswerte aus einer über 20 jährigen Erfolgsgeschichte. Seit 2004 zählt dazu auch die Entwicklung und Produktion des zweiachsigen Nachführsystems sonnen\_system zu dessen Leistungsspektrum eine ausgefeilte Sensor- und Sicherheitstechnik zählt. Die Produktionsprozesse wurden Zug um Zug automatisiert und die Fertigungskapazität am Standort Alheim bis zu einer Stückzahl von bis zu 1500 sonnen\_system pro Monat (Stand 01/2011) weiter ausgebaut. Im Jahr 2009 startete in Kooperation mit der Firma Soitec Solar GmbH die Entwicklung einer neuen sonnen\_system Generation für CPV-Technologie.

Das Projekt ist in folgende Arbeitspakete unterteilt:

- AP 1: Design eines Moduls mit Sekundäroptik
- AP 2: Modulmontagekonzept
- AP 3: Inline Charakterisierung der Module
- AP 4: Trackerdesign**
  - AP 4.1: Design der Tracker-Struktur**
  - AP 4.2: Antriebsauslegung**
  - AP 4.3: Anschlussauslegung**
  - AP 4.4: Ansteuerung**
  - AP 4.5: Trackingalgorithmus**
  - AP 4.6: Verteilung der Kräfte zwischen Modul und Tracker**
  - AP 4.7: Optimierung des Materialeinsatzes**
  - AP 4.8: Optimierung hinsichtlich der Massenfertigungstauglichkeit**

- AP 5: Sintertechnik
- AP 6: Optisches Design
- AP 7: Konzepte zur Werkzeugherstellung und Charakterisierung von großflächigen Lin-  
senparquets
- AP 8: Optimierung der Solarzellenbaugruppe und thermische Simulation
- AP 9: Optischer Kleber
- AP 10: Secondary Optimierung und Montage

Nachfolgend werden die Arbeiten in AP 4, für das die Kirchner Solar Group GmbH verantwortlich ist, be-  
schrieben.

## 2 AP4: Trackerdesign

### 2.1. Technischer Stand zu Projektbeginn

Bereits seit 2004 entwickelt, konstruiert und fertig die Kirchner Solar Group zweiachsig nachgeführte  
Tracker für zunächst konventionelle PV-Generatoren. Der Tracker wird dabei über einen astronomischen  
Algorithmus vollautomatisch der Sonne in Azimut und Elevation nachgeführt.

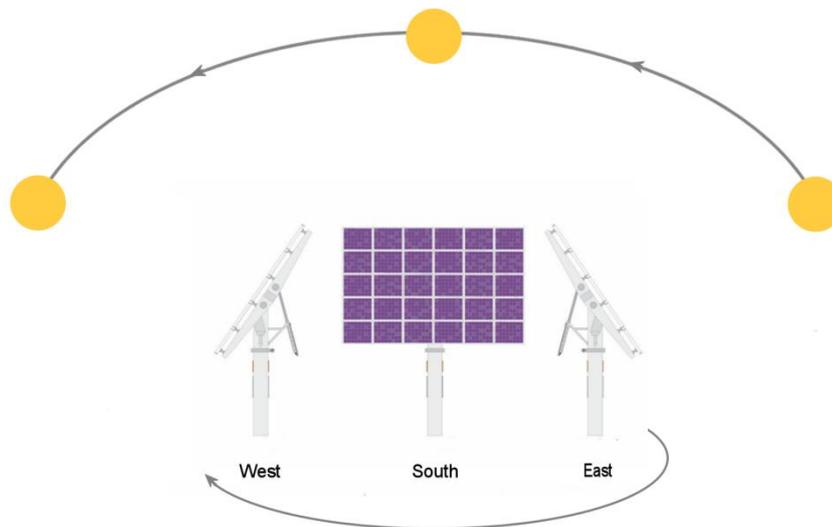
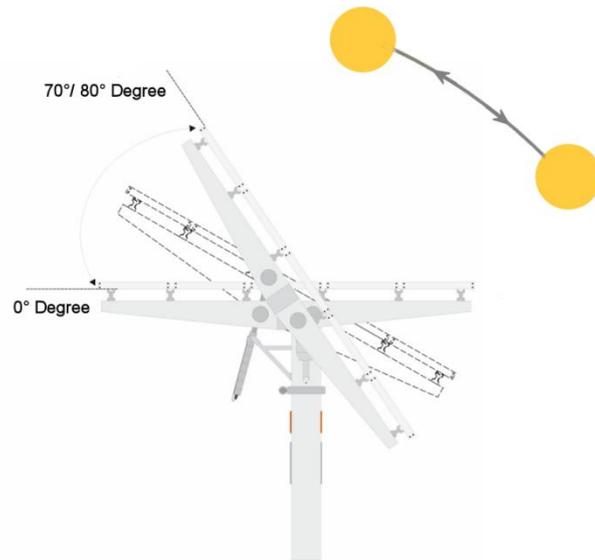


Fig. 1: Nachführung in Azimut



*Fig. 2: Nachführung in Elevation*

Diese Technologie ist für Standard PV-Nachführeinrichtungen wohlbekannt. Für die Anwendung mit CPV-Modulen müssen insbesondere was die Nachführgenauigkeit des Trackers nach der Sonne, die Steuerung und die Ausführung der Unterkonstruktion für die CPV-Module und deren Anbindung daran neuartige Wege beschrrieben werden.

Die Aktivitäten im AP4 umfassen Untersuchungen zur Auswahl des möglichen Trackerdesigns, des Nachführalgorithmus, den Prototypenbau und die Verifizierung der Daten aus dem Lasten-/ Pflichtenheft anhand der gewonnenen Messdaten.

Die Einzelfragestellungen sind in 8 Unterarbeitspakete strukturiert. Diese wurden teilweise parallel erarbeitet, teilweise bauen sie aufeinander auf und bedingen sich gegenseitig.

### 3 AP 4.1: Design der Tracker – Struktur

#### 3.1. Einleitung

Zweiachsige Nachführsysteme werden in verschiedenen Ausführungen angewandt und können nach der Hauptachsenausrichtung bezüglich des Geländes unterteilt werden. Zwei gängige Anwendungen sind die Nachführungen mit Kipp/Schwenk-Ausrichtung sowie Nachführeinrichtungen mit Azimut/ Höhenpositions-Ausrichtung. Eine Festlegung für den Azimutwinkel betrifft die „Winkelposition von Ost- in Nordrichtung“, wobei je nach gewählter interner Konvention, Süden z.B.  $0^\circ$ , Ost  $+90^\circ$  und West  $-90^\circ$  bedeuten. Der Elevationswinkel gibt den Winkel relativ zur horizontalen Achse an und befindet sich während des Betriebs zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ .

Laut interner Konvention der Kirchner Solar Group gilt für den Elevationswinkel folgende Vereinbarung:

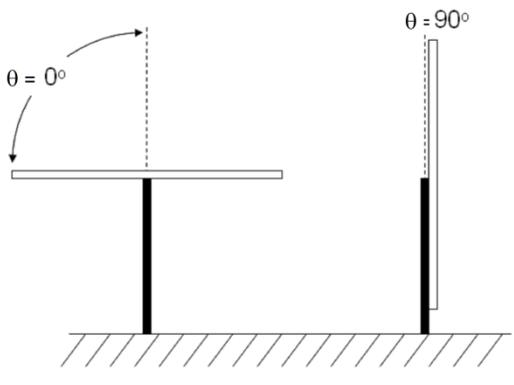


Fig. 3: Modulstellungen

Aus den Winkelstellungen in Azimut und Elevation ergibt sich die Ausrichtung der Modulfläche zur Sonneneinstrahlung, so dass im Idealfall die Sonnenstrahlen immer senkrecht zur Modulfläche einfallen. In der Regel ergibt sich aber ein Ausrichtungsfehler, der dem Winkel zwischen dem Ausrichtungsvektor des Moduls, welcher senkrecht zu dessen Oberfläche steht, und dem Ausrichtungsvektor des Sonnenstrahls entspricht. Dieser Fehlwinkel ergibt sich aus der Summe der gesamten Fehler aller Untersysteme, wie z.B. Getriebe, Nachführalgorithmus, Steuerung oder Unterkonstruktion und entspricht der gegenwärtigen Winkelabweichung zwischen der Ausrichtung der Nachführeinrichtung und dem augenblicklichen Stand der Sonne.

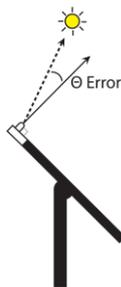


Fig. 4: Fehlwinkel der Modulfläche zur Sonneneinstrahlung

Ein für Standard PV-Anwendungen akzeptabler Fehlwinkel/ Akzeptanzwinkels kann z.B. mit dem Einsatz einer astronomischen Steuerung und ohne Berücksichtigung der aus der Unterkonstruktion oder den Antrieben resultierenden Fehler erreicht werden. Hier können Nachführeinrichtungen mit einer Genau-

igkeit von  $\pm 5^\circ$  mehr als 99,6% der Energie durch Direkteinstrahlung bereitstellen. Für den Einsatz von CPV-Modulen gelten andere Kriterien, die aus dem Akzeptanzwinkel (maximale Einfallswinkel unter dem noch Sonnenlicht auf den Wafer trifft) dieser Module resultieren. Ist der Fehlwinkel zur Sonne kleiner als dieser Akzeptanzwinkel, so trifft das Sonnenlicht auf den in jeder Zelle des Moduls sitzenden Wafer und Strom kann generiert werden. Befindet er sich hingegen außerhalb, so ist die Energiegewinnung gleich Null.

Ein erster Vergleich des möglichen Fehlwinkel  $\theta$  für PV- und CPV-Anwendungen zeigt, dass bei der CPV Anwendungen ein bis zu 50 x genauere Akzeptanzwinkel nötig sein kann.

Akzeptanzwinkel PV ( $v_{\text{wind}} = 0 \text{ m/s}$ ):  $-5^\circ \leq \theta \leq +5^\circ$

Akzeptanzwinkel CPV ( $v_{\text{wind}} = 0 \text{ m/s}$ ):  $-0.1^\circ \leq \theta \leq +0.1^\circ$

## 3.2. Fragestellung und Zielsetzung

Die Aufgabe besteht darin einen Tracker anhand der mit Soitec vereinbarten Spezifikationen zu entwickeln und Tracker-Prototypen aufzubauen. Die CPV-Module von Soitec sollen auf diesen installiert und anschließend die theoretisch berechneten Werte verifiziert werden.

Im ersten Schritt wird ein Lasten-Pflichtenheft erstellt, um sämtliche Anforderungen zu erfassen und in mögliche Maßnahmen zur Erfüllung von Seiten der Kirchner Solar Group umzusetzen. Zu diesen vorgegebenen Randparametern zählen beispielsweise Angaben zum Akzeptanzwinkel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, der geforderten Wind- und Schneelastzone, der Dimensionierung der Module und Vorgaben zu möglichen Installationsstandorten und den dort geltenden gesetzlichen und behördlichen Anforderungen.

## 3.3. Beschreibung der wichtigsten Randparameter

### 3.3.1. Größe der Modulfläche

Die Statik des Trackers und seine Nachführeigenschaften werden stark von der gewählten Modulflächengröße und –abmessung beeinflusst. Daraus ergibt sich eine direkte Abhängigkeit zwischen dieser Größe und dem Materialeinsatz von Stahl- und Antriebskomponenten. 3 mögliche Varianten sollen mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

- a) 2 Reihen Module\* x 5 Module => 87 m<sup>2</sup>
- b) 2 Reihen Module x 6 Module => 105 m<sup>2</sup>
- c) 3 Reihen Module x 5 Module => 122 m<sup>2</sup>

\* von Soitec angegebene Modulabmaße: 3,67 m x 2,39 m x 0,17 m mit. 240 kg

### 3.3.2. Trackinggenauigkeit

Die Trackinggenauigkeit resultiert aus der Summe aller Ungenauigkeiten am System und entspricht somit dem Fehlwinkel zwischen dem Normalenvektor der Modulfläche (Module face vector) und dem Sonnenvektor. Eine hohe Trackinggenauigkeit geht also einher mit einem kleinen Fehlwinkel.

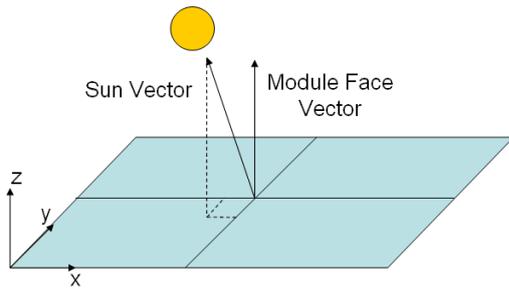


Fig. 5: Trackinggenauigkeit

Ziel ist eine Trackinggenauigkeit von 25% des Akzeptanzwinkels der Module für das komplette Nachführsystem inklusive Steuerung zu erreichen. Hauptsächlich wird die Nachführgenauigkeit von den folgenden 3 Faktoren beeinflusst:

- a) Durchbiegung in der Struktur
- b) Mechanisches Spiel in den Antrieben
- c) Steuerungsungenauigkeiten

a) Durchbiegung in der Struktur

Die Durchbiegung kann anhand der unten stehenden Grafik visualisiert werden. Die Pfeile zeigen den Normalenvektor einer idealen, durchbiegefreien Modulfläche, bzw, einer gebogenen an.

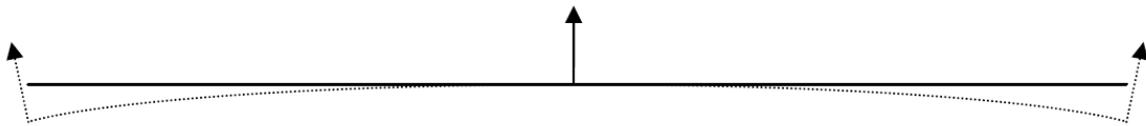


Fig. 6: Schnittdarstellung einer idealen und gebogenen Modulfläche

Die Durchbiegung kann in drei verschiedene Typen unterteilt werden:

- Statische Durchbiegung
- Dynamische Durchbiegung
- Durchbiegung durch Windeinflüsse

Die statische Durchbiegung kann als konstant über die Zeit angenommen werden. Darin enthalten sind sämtliche Fertigungstoleranzen der Stahlkonstruktion und der Module. Diese kann gut über eine Vorrichtung zur Moduljustage ausgeglichen werden.

Die dynamische Durchbiegung wird durch die unterschiedlichen Stellungen der Modulfläche in Elevation hervorgerufen und ändert sich permanent im Laufe eines Tages. Zum Beispiel ist der Vektor der Gravitationskraft morgens bei einer Modulstellung von ca. 90° annähernd parallel zur Modulfläche und in der Mittagszeit (Modulstellung ca. 0°) nahezu senkrecht dazu. Die dynamische Durchbiegung kann nicht über eine Moduljustage ausgeglichen werden.

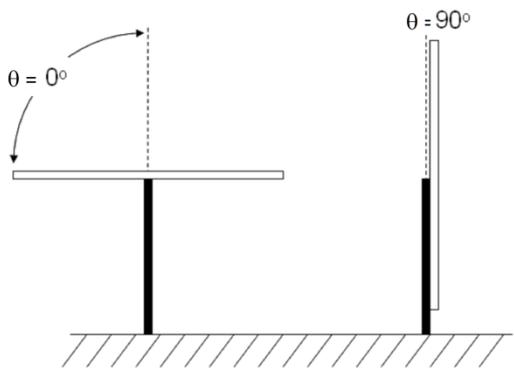


Fig. 7: Modulstellungen

Die Durchbiegung durch Windeinflüsse erfolgt wenn Wind auf den Tracker einwirkt und somit eine Biegung der Stahlstruktur und/ oder Module erfolgt. Das dynamische Verhalten des Trackers unter Wind ist sehr schwierig zu simulieren und lässt sich auch durch eine Moduljustage nicht kompensieren. Um trotzdem eine Näherung und mögliche Anpassung an verschiedene Windsituationen zu erzielen, werden für die Berechnungen statische Windwerte zugrunde gelegt. Darüber hinaus werden die Anforderungen an die Trackinggenauigkeit in Abhängigkeit der Windstärke in verschiedene Intervalle unterteilt.

Trackinggenauigkeit	Windgeschwindigkeit [m/s]
$\pm 0,2^\circ$	$v = 0$
$0,2^\circ + 0,0179 \times \text{Windgeschwindigkeit}$	$0 < v < 14$
$\pm 0,45^\circ$	$v = 14$
Sicherheitsposition	$14 < v < 22,4$

### b) Mechanisches Spiel in den Antrieben

Durch ein mechanisches Spiel in den Antrieben, hervorgerufen z.B. durch Passungenauigkeiten in den Getrieben, kann die genaue Positionierung des Trackers herabgesetzt werden. Darüber hinaus kann ein zu hohes Spiel in Kombination mit Wind zu einem erhöhten Verschleiß der Antriebe führen.

### c) Steuerung der Antriebe

Zwei Faktoren können hier zu Tracking-Ungenauigkeiten führen:

- Schrittweite der Antriebe
- Genauigkeit des Steuerungsalgorithmus

Die Schrittweite der Antriebe muss so ausgelegt werden, dass eine exakte Ausrichtung der Modulfläche zur Sonne erreicht werden kann. Als hinreichende Schrittweite, sowohl für den Antrieb in Azimut als auch in Elevation ist ein Wert von  $\leq 0,03^\circ$  definiert, der auch Verfahrengenauigkeit der Antriebe genannt wird. Im gleichen Maße gilt dies auch für den Steuerungsalgorithmus, der abgestimmt auf die Antriebe eine möglichst schnelle und präzise Nachführung erlauben und umsetzen muss.

### 3.3.3. Verfahrensgeschwindigkeit und -genauigkeit (Azimut und Elevation)

Die minimalen Anforderungen an die Geschwindigkeit während des normalen Tracking Betriebs ergeben sich aus der Nachführunggenauigkeit und damit aus der Geschwindigkeit mit der sich die Position der Sonne verändert. Darüber hinaus ist eine Fahrzeit des Trackers aus der steilsten Elevation - Position in die

Schutzposition von maximal 10 Minuten gefordert. In Äquatornähe ist zusätzlich aufgrund des besonderen Sonnenverlaufs eine schnelle Verfahrung in Azimut um 180° nötig.

### 3.3.4. Installationsort

Für die Entwicklung eines Nachführsystems ist die Frage nach dem Installationsort von zentraler Bedeutung, da der Nachführbereich in Azimut je nach Hemisphäre unterschiedlich ist, wie unten stehende Grafik veranschaulicht. Rot gekennzeichnet ist der für die jeweilige Hemisphäre nötige Verfahrbereich des Trackers.

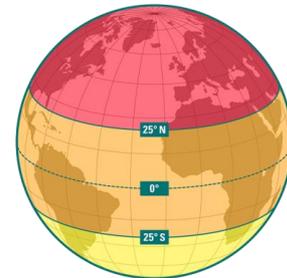


Fig. 8: Hemisphären

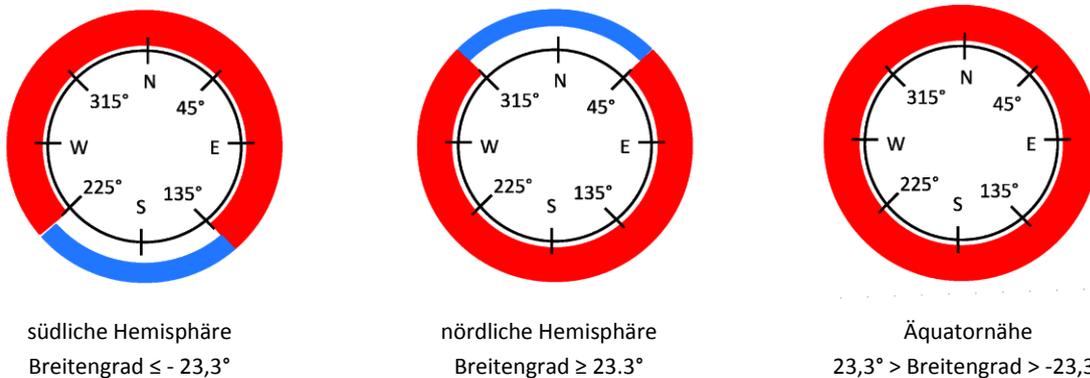


Fig. 9: Nachführbereich in Azimut für Hemisphären

Wie man erkennt, ist der Verfahrbereich für die nördliche und südliche Hemisphäre lediglich gespiegelt und die Anforderungen an den Tracker, dessen Equipment und Ansteuerung für Installation in beiden Hemisphären sehr ähnlich. Der, gerade für CPV-Anwendungen, interessante Äquatorbereich unterscheidet sich allerdings sehr deutlich in seinen Anforderungen, insbesondere durch den benötigten Verfahrbereich und durch die an manchen Tagen auftretende sehr hohe Bahngeschwindigkeit der Sonne.

### 3.3.5. Umgebungsbedingungen

Die Betriebsdauer des Nachführsystems ist auf 25 Jahre ausgelegt. Damit diese ohne größere Störungen und Ausfälle erreicht werden kann (hier werden unter anderem die MTBF Zeiten = meantime between failure berücksichtigt) müssen die Einflüsse der im Lasten - Pflichtenheft definierten Umgebungsbedingungen in die Entwicklung miteinbezogen werden. Dies bezieht sich neben den Windeinflüssen insbesondere auf den Schutz der Stahlbauteile gegen Korrosion, die Temperatureinflüsse auf die elektromechanische Komponenten und somit auch der Lebensdauer der Antriebe, die einen erheblichen Kostenfaktor darstellen. Daneben werden die zu erwartenden Schneelasten in der Sensitivitätsanalyse näher untersucht.

### 3.3.6. Gesetze, Normen, Richtlinien

Die wichtigsten zu berücksichtigten Gesetze, Normen und Richtlinien für dieses Projekt sind:

- Maschinenrichtlinie 2006/42/EG
- EMV Richtlinie 2004/108/EG
- DIN EN 62817:2013 Sonnen-Nachführeinrichtungen für photovoltaische Systeme-Bauartefignung
- Eurocode DIN EN 1991 Reihe, DIN EN 1998, Reihe – Tragwerksplanung
- DIN EN ISO 12100 Sicherheit von Maschinen

### 3.4. Auswahl der Tracker Geometrie

Da im Gegensatz zu den PV Modulen ein CPV Modul nur die direkte Sonneneinstrahlung als Primärenergiequelle nutzen kann, muss die Ausrichtung nach der Sonne mittels eines zweiachsigen Nachführsystems erfolgen. Zweiachsige Nachführsysteme weisen zwei Freiheitsgrade für die Achse der Drehbewegung auf. Diese Achsen stehen üblicherweise senkrecht zueinander, wobei die am Gelände befestigte Achse als Hauptachse angesehen wird. Die Nebenachse ist zur Hauptachse in der Regel senkrecht angeordnet.

Um zunächst die geeignete Geometrie einzugrenzen, wurde die unten stehende Nutzwertanalyse durchgeführt. Diese zeigt die Auswahlkriterien, die prozentual gewichtet in die Entscheidung einfließen. Mit einbezogen wurde auch die jeweils verfügbare oder benötigte Fundamentart, wobei insbesondere die Größe = benötigtes Material, die Machbarkeit = nicht jedes Fundament kann auf jedem Untergrund eingesetzt werden, und die benötigten Baumaschinen eine Rolle spielen. Beispielsweise entstehen Schwierigkeiten, wenn große Betonfundamente in abgelegenen Regionen mit kaum vorhandener Infrastruktur erstellt werden müssen. Diese Kosten zählen zwar nicht zu denen des Trackers, werden aber sehr wohl von potentiellen Interessenten in die Gesamtkosten einer Anlage einkalkuliert. Das Hauptaugenmerk liegt allerdings auf den Kriterien Genauigkeit und Montage/Betrieb/Wartung. Das heißt, wie wird die erwartete Nachführgenauigkeit und damit die Rentabilität des Systems bewertet und wie einsetzbar, bzw. wie fällt die prognostizierte Kosten-Nutzenanalyse für die betrachtete Geometrie aus?

Die hier stichpunktartig aufgeführten Argumente zu den einzelnen Auswahlkriterien, die zur Bewertung 0; 1 oder 2, mit 2=Bestnote, wurden zuvor im Team kontrovers diskutiert und bewertet.

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse ist die Favorisierung eines Trackers mit Vertikalachse, der mit einer Bewertungszahl von 1,84 vor den anderen beiden in die engere Auswahl gekommenen Systemvarianten rangierte.

### 3.5. Evaluierung der Konstruktionsvarianten

Für die Entwürfe der Konstruktionsvarianten lässt sich eine grobe Unterteilung nach den sogenannten Hauptbaugruppen vornehmen. Diese sind in unten stehender Abbildung aufgeführt.

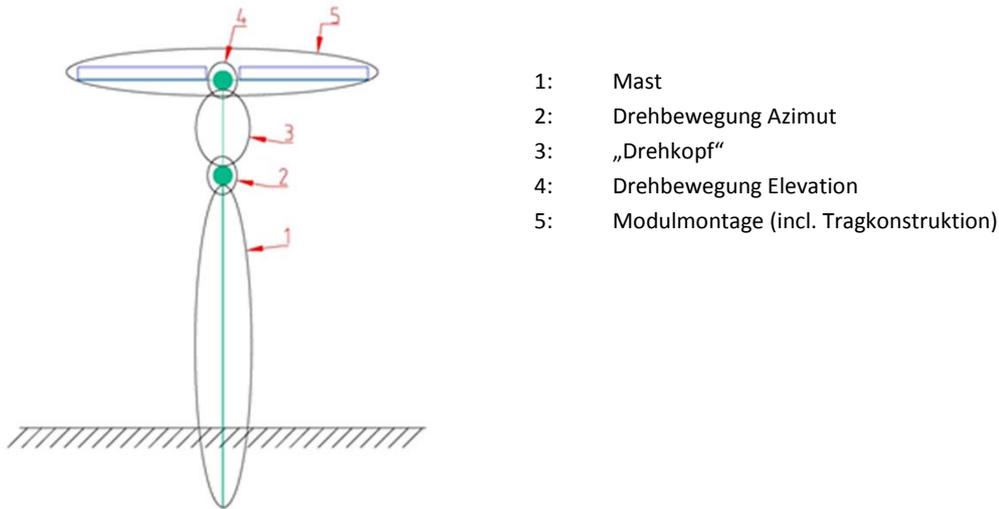


Fig. 10: Hauptbaugruppen

Da bereits eine Entscheidung zugunsten eines Systems mit Vertikalachse gefallen war, kamen bei der Betrachtung der möglichen Mast-Varianten unter anderen noch die in Fig. 11 gezeigten Varianten in die engere Auswahl. Eine genaue Abwägung der jeweiligen technischen Vor- und Nachteile gegen die entstehenden Kosten, wie Produktion incl. aller Arbeitsschritte und Verzinkung, Montage und Fundamentstellung führte zu einer Entscheidung zugunsten der Ein-Mast Variante. Hier wird eine Ausführung mit einem Bodenflansch als Anbindungsmöglichkeit an ein bestehendes Fundament gezeigt. Dieser Mast kann in gleicher Güte auch für direkte Fundamentanbindung hergestellt werden. Auch kann hier neben dem Standardfundament ein Pfahl- oder Bohrfundament eingesetzt werden, wohingegen diese Verfahren für den Dreibeinmast nicht angewandt werden können. Pfahl- oder Bohrfundamente sind aber gerade für Groß-Projekte finanziell attraktiver, da sie zwar mit größeren Maschinen, dafür aber mit weniger Material- und Zeitaufwand realisiert werden können.

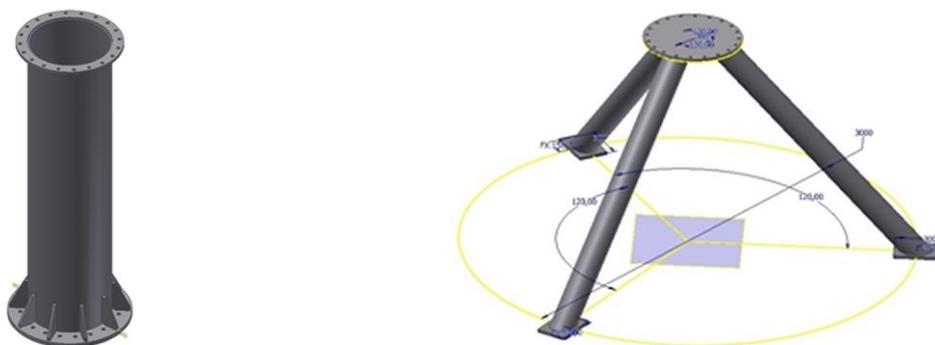


Fig. 11: Mast Varianten

Als Drehkopf des Trackers wird diejenige Baugruppe genannt, die zusammen mit den Antriebseinheiten, die Module und deren Tragkonstruktion in Elevation- und Azimut bewegt. Dort wurden die unten stehenden Varianten diskutiert. Die Varianten 1 und 2 erfordern jeweils zwei getrennte Antriebseinheiten

für die Bewegungen in Azimut und Elevation. Auch sind die Material- und Montagekosten pro Quadratmeter Generatorfläche sehr hoch. Variante 3 zeigt eine sehr montagefreundliche Konstruktion mit, gegenüber den anderen Varianten, deutlich reduziertem Materialeinsatz. Auch werden hier die Antriebseinheiten für Azimut und Elevation in einem zweiachsigen Schwenktrieb (Dual-axis drive) zusammengefasst, was erheblich zur Verschlanung der Konstruktion beiträgt. Marktrecherchen ergaben, dass sich der Einsatz eines zweiachsigen Schwenktriebs in Verbindung mit dem reduzierten Montageaufwand kostenmäßig sehr gut gegenüber den herkömmlichen Schwenktrieben darstellen lässt.



Fig. 12: Drehkopf Varianten 1



Fig. 13: Drehkopf Varianten 2



Fig. 14: Drehkopf Variante 3 mit Dual-axis drive

Hinsichtlich der Tragkonstruktion für die Module muss im Vorfeld der Entwicklung die voraussichtliche Modularchitektur, wie z.B. Aufbauhöhe und Ausführung des Rahmens mit berücksichtigt werden. Da diese Parameter zu Beginn des Projektes noch offen waren, gingen die Überlegungen in Richtung möglichst großer Flexibilität, so dass auch unterschiedlich dimensionierte Module, unabhängig von Aufbauhöhe oder Rahmenauslegung montagefreundlich integriert werden können. Unten stehende Abbildungen zeigen die ersten Annäherungen an die Tragkonstruktion, mit entweder einer Rippenstruktur (blau) oder einer Rahmenstruktur (rot). Rechts dargestellt ist die mögliche Ausführung der Tragkonstruktion an die Tragrohre.

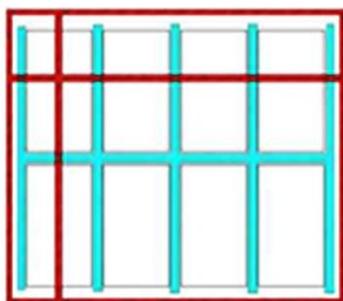


Fig. 15: Tragkonstruktionen

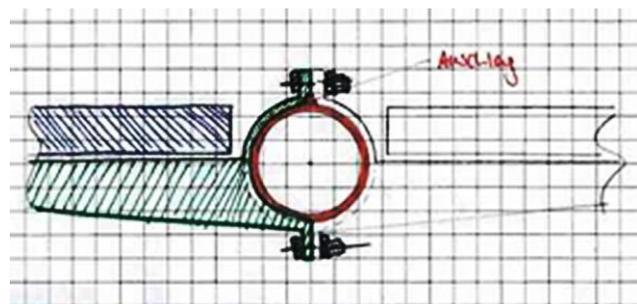


Fig. 16: Mögliche Anbindung an das Tragrohr

### 3.6. Sensitivitätsanalyse

An dem unter 3.4 favorisierten Tracker wurde im nächsten Schritt mittels einer Sensitivitätsanalyse eine technische/ wirtschaftliche Kosten - Nutzenanalyse bezüglich der Größe der Modulfläche, Varianten der Nachführgenauigkeit in Kombination mit vordefinierten Wind- und Schneelastfällen durchgeführt. Ziel war es einen wirtschaftlichen Tracker mit guten Nachführeigenschaften und trotzdem möglichst geringen Kosten über die gesamte Produkt-Lebenszeit zu konstruieren. Erfahrungsgemäß ist der größte Kostenfaktor für ein Nachführsystem die Stahlkonstruktion. Diese Kosten summieren sich auf aus den reinen Stahlpreisen, der Bearbeitung, Verzinkung und den Allgemeynkosten, wie z.B. Transport, Verpackung und machen ca. 60 % der prognostizierten Gesamtkosten aus. Aus diesem Grund liegt das Hauptaugenmerk der Sensitivitätsanalyse auf der Reduzierung des Materialeinsatzes und den daraus resultierenden Folgekosten. Daneben hat natürlich eine Material- und damit Gewichtsreduzierung direkten Einfluss auf die mögliche Antriebsgröße und –kosten.

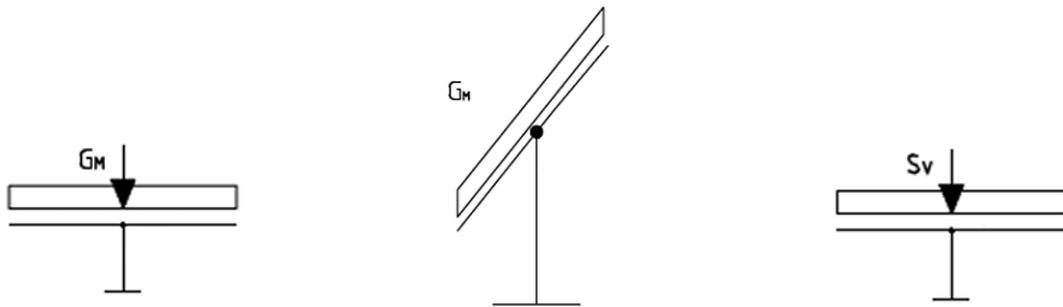
Anhand der nachstehenden Varianten wurde evaluiert, welcher Materialeinsatz der Nachführung für welche Modulflächengröße und Akzeptanzwinkel erforderlich ist.

- a) 2 Reihen Module \* x 5 Module => 87 m<sup>2</sup>
- b) 2 Reihen Module x 6 Module => 105 m<sup>2</sup>
- c) 3 Reihen Module x 5 Module => 122 m<sup>2</sup>

\* von Soitec angegebene Modulabmaße: 3,67 m x 2,39 m x 0,17 m mit. 240 kg

Die dazu verwendete Berechnungsmethode zur Auslegung und Dimensionierung eines Tragwerks ist die Finite Elemente Methode (FEM). Dabei wird die Tragwerk - Geometrie, bestehend aus zusammengesetzten Einzelkomponenten, in hinreichend kleine, endliche (finite) Elemente unterteilt und über diese Elemente approximierten Funktionen eingeführt. Diese lassen sich mit einer endlichen Zahl von Parametern beschreiben und die zu lösenden Differentialgleichungen lassen sich nunmehr numerisch lösen. Diese Methode wird für eine Vielzahl von Problemstellungen angewandt und für statische Betrachtungen von Tragwerken ist die zu suchende Variable die sogenannte Verschiebung. Die Verschiebung sagt aus, um wie viel sich das einzelne Element unter einer Kräfteinwirkung F verschiebt, wobei diese Verschiebung eine Translation, Rotation und Verformung des Körpers darstellt. Das Zusammenspiel sämtlicher Verschiebungen in einem Tragwerk, ergibt, meist grafisch dargestellt, dessen Verformung unter Einwirkung dieser Kraft. Kräfteinwirkungen auf das Tragwerk Nachführsystem entstehen hauptsächlich durch dessen Eigenlast zuzüglich der installierten Module als Resultierende der Gravitationskraft und durch Windinflüsse und/ oder Schneelasten auf der Modulfläche.

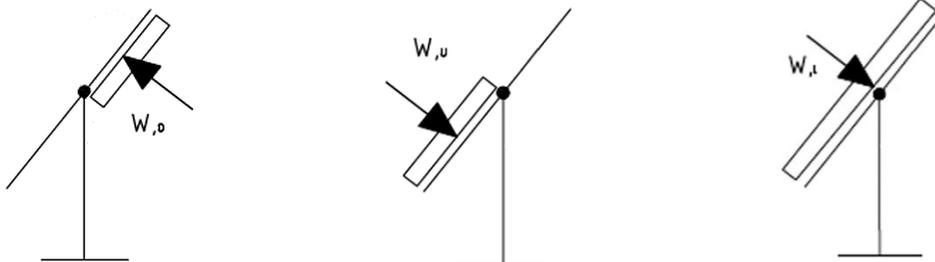
In Zusammenarbeit mit einem externen Büro für statische Berechnungen wurden die zu überprüfenden Lastfälle und deren Randbedingungen festgelegt.



Lastfall 1 Eigenlast mit Modulen,  
0°-Position

Lastfall 2: Eigenlast mit Modulen,  
45°-Position

Lastfall 3: Schneelast, voll, 0°-Position



Lastfall 4: Windlast einseitig, oben;  
85°-Position

Lastfall 5: Windlast einseitig, unten;  
85°-Position

Lastfall 6: Windlast einseitig, links  
oder rechts 85°-Position

Fig. 17: Lastfälle

Der Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke DIN EN 1991-1-4:2005 Allgemeine Einwirkungen, Windlast gibt zur Berechnung der Gesamtwindkraft, die auf einen Baukörper oder Körperteil einwirkt, die nachstehende Anfangsgleichung, berechnet aus Kraftbeiwerten, für die resultierende Windkraft  $F_W$  an:

$$F_W = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Dabei ist:

$c_s c_d$	Strukturbeiwert
$c_f$	Kraftbeiwert
$q_p(z_e)$	Böengeschwindigkeitsdruck in Bezugshöhe $z_e$
$A_{ref}$	Bezugsfläche

Der Strukturbeiwert  $c_s c_d$  berücksichtigt zum einen, dass Spitzenwinddrücke nicht gleichzeitig auf der gesamten Oberfläche auftreten können ( $c_s$ ) und zum anderen die dynamische Überhöhung durch Bauwerksschwingungen infolge von Windturbulenzen ( $c_d$ ). Der Kraftbeiwert  $c_f$  charakterisiert die resultierende Windkraft, die je nach Geometrie des Bauwerks und den daran auftretenden Strömungen und Verwirbelungen sehr unterschiedlich ausfällt. Hier erfolgen die Berechnungen analog zu der Geometrie eines freistehenden Pultdachs. Freistehende Dächer sind Dächer, an die sich nach unten keine durchgehenden Wände anschließen, wie z.B. Tankstellendächer oder Bahnsteigüberdachungen. Das Vorzeichen des Kraftbeiwertes zeigt die Richtung der resultierenden, einwirkenden Windkraft an und damit, ob die vorherrschende Krafteinwirkung Druck ( $+c_f$ ) oder Sog ( $-c_f$ ) entspricht:

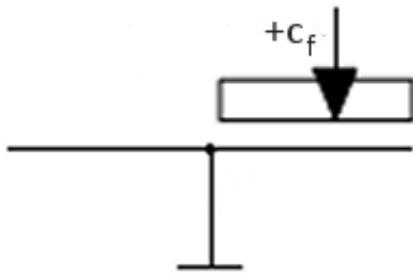


Fig. 18: Resultierende Windkraft nach unten =  $+c_f$  = Druck

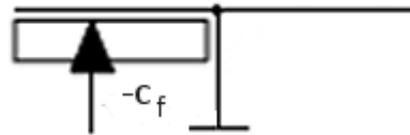


Fig. 19: Resultierende Windkraft nach oben =  $-c_f$  = Sog

Die Bezugsfläche  $A_{ref}$  ist für das Nachführsystem die Modulfläche. Der Böengeschwindigkeitsdruck ergibt sich ebenfalls aus den Berechnungen des Statikbüros. Dafür wurden für die Lastfälle 4 bis 6 jeweils Windgeschwindigkeiten von 14 m/s und 22 m/s angesetzt.

Folgende Kombinationen wurden untersucht:

Modulflächen- größe A	Akzeptanzwinkel		
	0,1°	0,2°	0,3°
87 m <sup>2</sup>	x	x	x
105 m <sup>2</sup>	x	x	x
122 m <sup>2</sup>	x	x	x

Fig. 20: Modulflächengröße - Akzeptanzwinkel

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die auftretenden Verschiebungen, also die durch eine Krafteinwirkung auftretende elastische Verformung bzw. die Durchbiegung in der Stahlstruktur oder den Modulen. Dabei symbolisiert rot die maximal- und blau die minimalauftretende Verschiebung. Je nach Modulflächengröße muss, um den gewählten Akzeptanzwinkel zu erreichen der dementsprechende Materialeinsatz, entweder durch Aufdickung, Querschnittsänderungen oder geänderten Werkstoff erreicht werden. Ergo gilt: je kleiner der gewählte Akzeptanzwinkel ist, desto kleiner darf die maximal auftretende Verschiebung in der Struktur sein. Im Lastfall 1 wird die Verschiebung, also die elastische Verformung des Tragwerks und damit der Module in der 0°-Position unter Eigenlast mit Modulen untersucht. Wie zu erwarten ist die Durchbiegung an den Ecken der Modulfläche mit ca. 20 mm am größten.

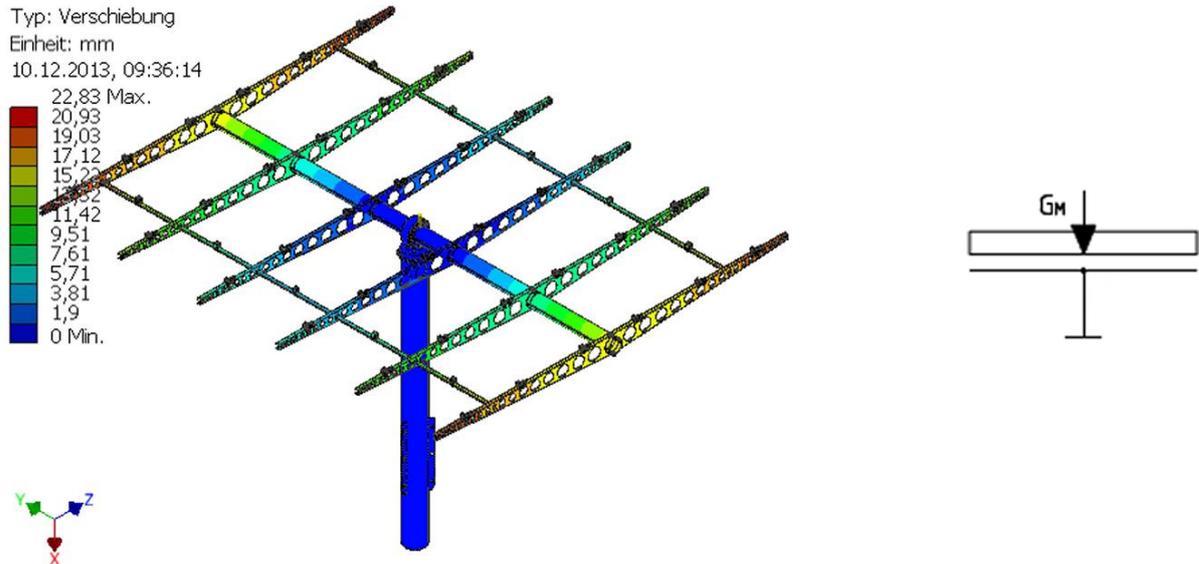


Fig. 21: Beispiel FEM Analyse Lastfall 1, Verschiebungen in der Tragkonstruktion,  $A = 122 \text{ m}^2$  Akzeptanzwinkel  $0,2^\circ$

Diese Verschiebung lässt sich noch deutlicher durch die Darstellung (Fig. 21) mit Modulen visualisieren.

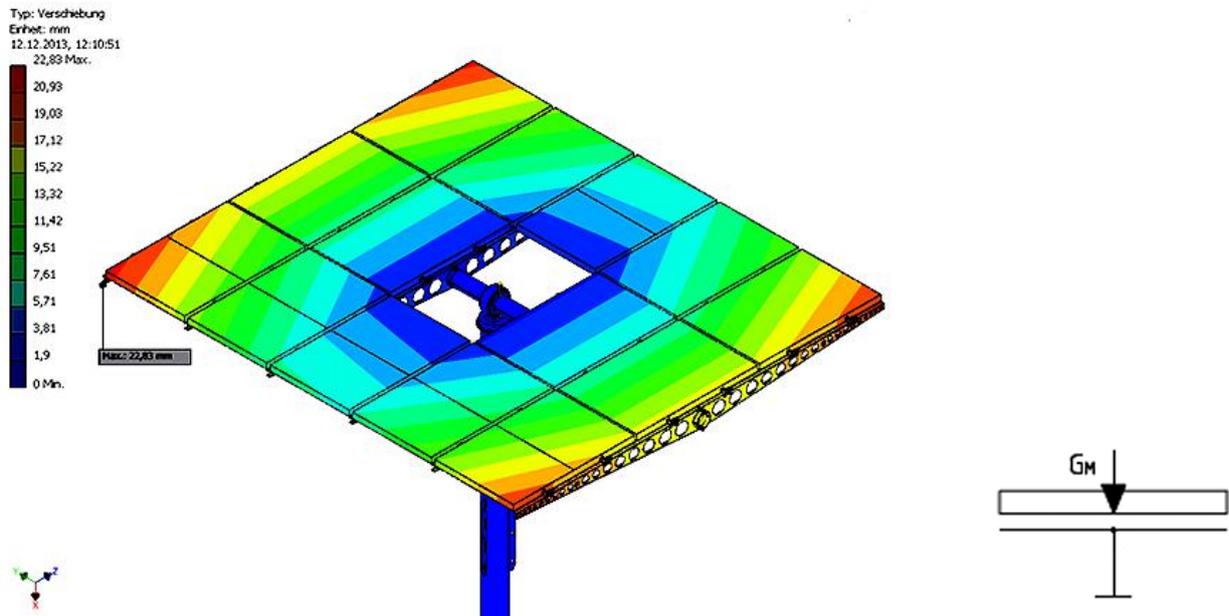


Fig. 22: Beispiel FEM Analyse Lastfall 1, Verschiebungen in den Modulen,  $A = 122 \text{ m}^2$  Akzeptanzwinkel  $0,2^\circ$

In Fig. 23 ist die FEM Analyse für den Lastfall 2 „Eigenlast mit Modulen in  $45^\circ$  Stellung“ zu sehen. Hier treten die größten Verschiebungen mit 17,66 mm erwartungsgemäß in den unteren Ecken der Modulfläche auf.

Typ: Verschiebung  
 Einheit: mm  
 12.12.2013, 13:34:02  
 19,27 Max.

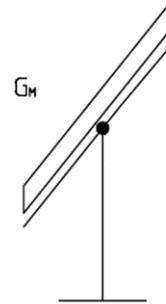
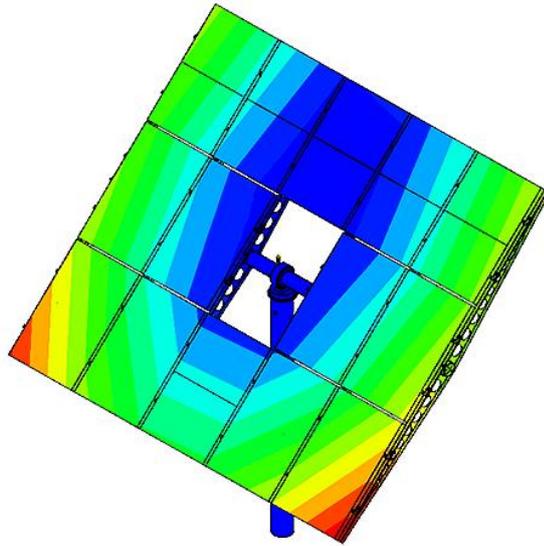
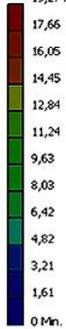


Fig. 23: Beispiel FEM Analyse Lastfall 2, Verschiebungen in den Modulen,  $A = 122 \text{ m}^2$  Akzeptanzwinkel  $0,2^\circ$

Da die Modulunterkonstruktion spiegel- und punktsymmetrisch konzipiert wurde, konnte davon ausgegangen werden, dass die elastische Verformung unter jeweils einseitiger Lasteinwirkung ebenfalls symmetrisch sein würde. Dieses konnte sowohl für die Lastfälle 4 und 5 (Wind einseitig auf der oberen bzw. unteren Modulflächenhälfte) als auch für den Lastfall 6 (Windlast einseitig links bzw. einseitig rechts) gezeigt werden. Die Analyse der Lastfälle 4 und 5 konnte dementsprechend zusammengefasst werden, was eine erhebliche Zeitersparnis für die Berechnungen bedeutete.

Typ: X Verschiebung  
 Einheit: mm  
 27.05.2013, 16:21:02  
 25,5 Max.

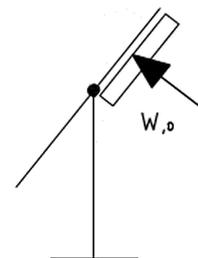
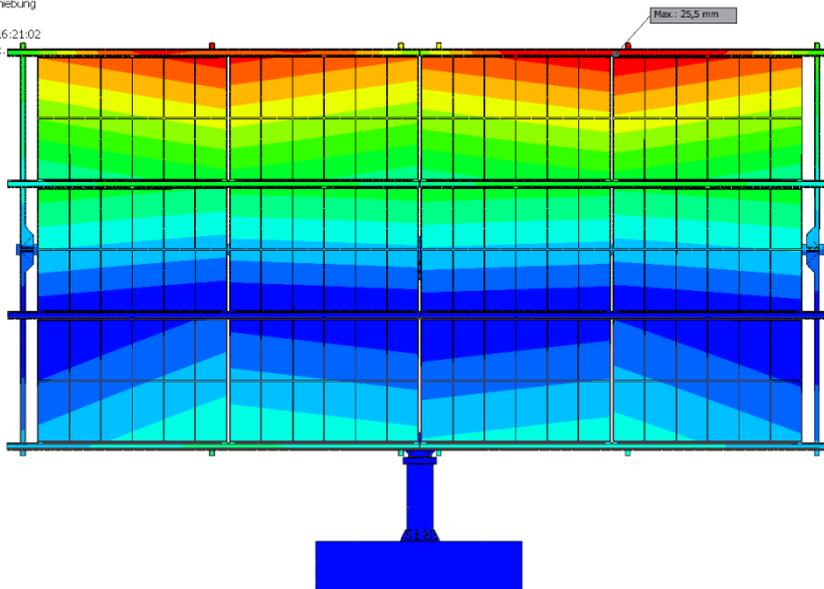
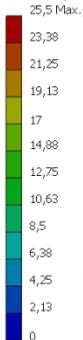


Fig. 24: Beispiel FEM Analyse Lastfall 4, Verschiebungen in den Modulen,  $A = 122 \text{ m}^2$  Akzeptanzwinkel  $0,2^\circ$

Ebenfalls nachgewiesen werden konnte, dass die auftretenden Verformungen bei Wind von vorne, also auf die Modulfläche, oder von hinten also auf die Rückseite der Modulfläche annähernd gleich groß sind, so dass lediglich der marginal schlechtere Fall „Wind von hinten“ betrachtet wird, wie auch in Fig.

25 durch die Pfeile gezeigt. Dort wird die linke Modulhälfte mit einer Windgeschwindigkeit von 22 m/s beströmt.

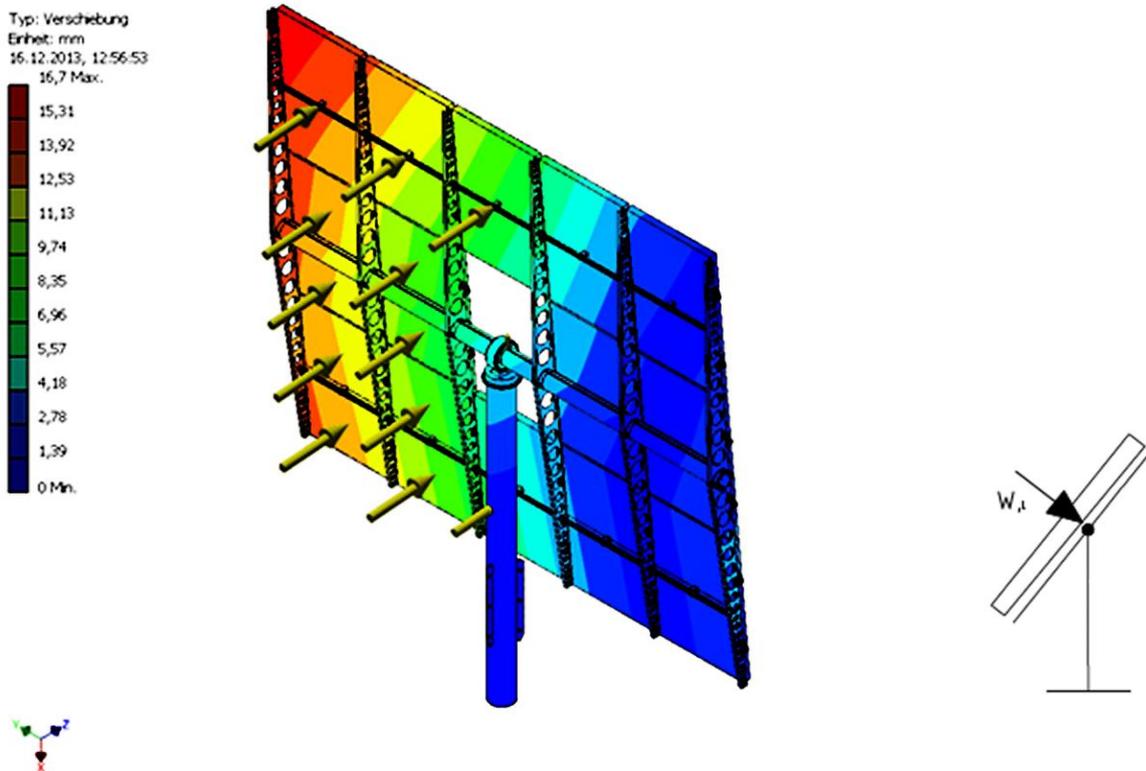


Fig. 25: Beispiel FEM Analyse Lastfall 6, Verschiebungen in den Modulen,  $A = 122 \text{ m}^2$  Akzeptanzwinkel  $0,2^\circ$

### 3.6.1. Ergebnisse

Das beste Kosten-Nutzen Verhältnis, rein auf das Materialgewicht bezogen, ergab sich für einen Akzeptanzwinkel von  $0,3^\circ$  und einer Modulfläche von  $122 \text{ m}^2$ .

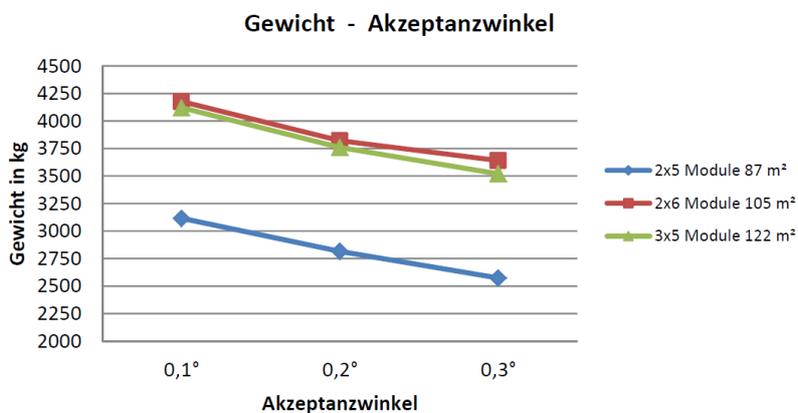
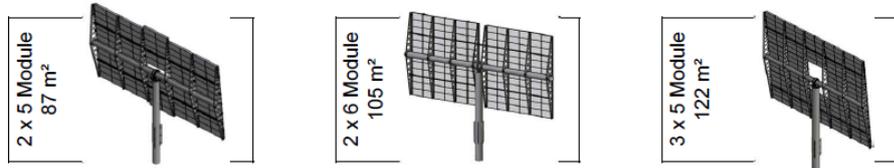


Fig. 26: Gewicht Stahlbau in Abhängigkeit des Akzeptanzwinkels

Nach Rücksprache mit Firma Soitec wurde ein Akzeptanzwinkel von  $0,3^\circ$  als nicht ausreichend für die zukünftigen CPV Module betrachtet. Stattdessen wurde ein Akzeptanzwinkel von  $0,2^\circ$  präferiert. Die nachstehende Tabelle Fig. 27 zeigt die durchgeführte Sensitivitätsanalyse die neben sämtlichen möglichen reinen Kosten für den Tracker auch Baunebenkosten wie Fundamentierung mitberücksichtigt. Mit 1,55

Punkten wurde dort die Variante mit 122 m<sup>2</sup> als bestmögliche eruiert. Damit ist der Meilenstein 4.1 erreicht.

**Sensitivitätsanalyse**



	Gewichtung ( % )	Bewertung ( 0,1,2 )	Bewertungszahl G*B	Bewertung ( 0,1,2 )	Bewertungszahl G*B	Bewertung ( 0,1,2 )	Bewertungszahl G*B
Fundament	5%	2	0,1	1	0,05	1	0,05
		geringere Rammtiefe kleineres Fundament		größere Rammtiefe größeres Fundament		größere Rammtiefe größeres Fundament	
Konstruktion	45%	1	0,45	1	0,45	2	0,9
		32,37 kg/m <sup>2</sup>		36,38 kg/m <sup>2</sup>		30,81 kg/m <sup>2</sup>	
Antrieb	30%	2	0,6	1	0,3	1	0,3
		kleinerer Antrieb möglich		größerer Antrieb nötig		größerer Antrieb nötig	
Montage	10%	2	0,2	1	0,1	1	0,1
		1 Mast, 6 Tragarme 10 Module		1 Mast, 8 Tragarme 12 Module		1 Mast, 6 Tragarme 14 Module	
Logistik	5%	2	0,1	2	0,1	2	0,1
		wenig Komponenten		wenig Komponenten		wenig Komponenten	
Betrieb/Wartung	5%	1	0,05	2	0,1	2	0,1
		mehr Systeme für gleiche Leistung		weniger Systeme für gleiche Leistung		weniger Systeme für gleiche Leistung	
	100%		<b>1,5</b>		<b>1,1</b>		<b>1,55</b>

Fig. 27: Sensitivitätsanalyse

### 3.7. Konstruktionsentwurf

Nach Abschluss der Sensitivitätsanalyse wurde ein 3D-Modell für den ersten Prototypen erstellt. Dieser besteht aus den in Fig. 28 -Fig. 31 gezeigten Komponenten.

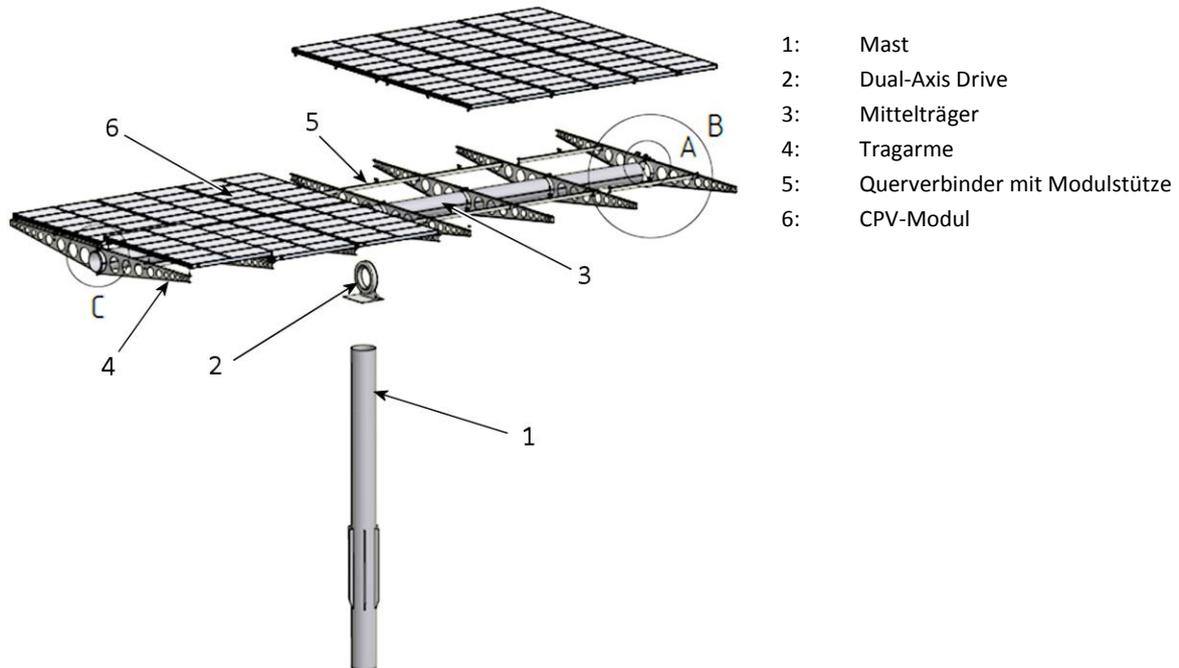


Fig. 28: Übersichtszeichnung

Der Mast wurde mit Verdreh- und Abhebsicherung ausgeführt und soll zukünftig in mehreren Längen-/Durchmesservarianten angeboten werden. Auch die Anflanschung an ein bestehendes Fundament ist vorgesehen.

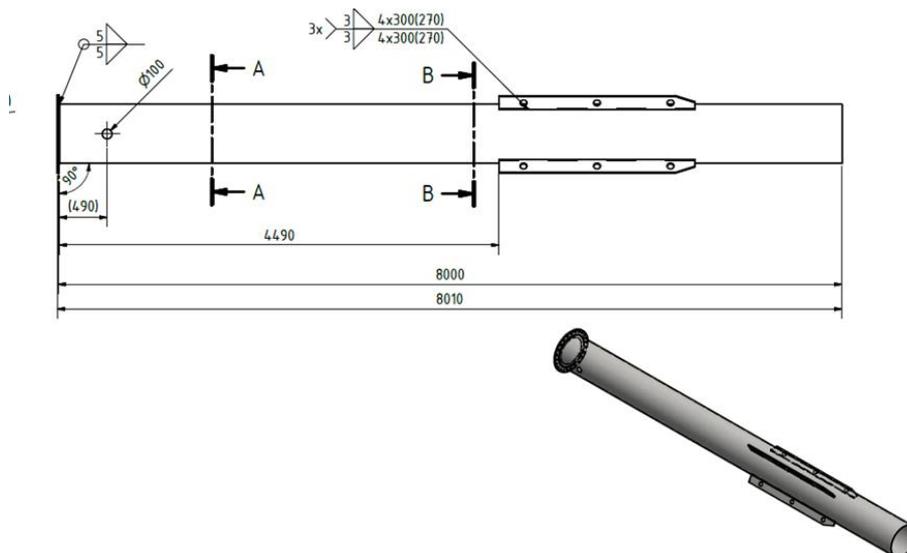


Fig. 29: Mast

Die Unterkonstruktion für die Module wurde spiegelsymmetrisch ausgeführt und besteht aus 2 Tragrohren, die an den Dual-Axis Schwenktrieb angeflanscht werden und den auf die Tragrohre aufgeklebten Tragarme.

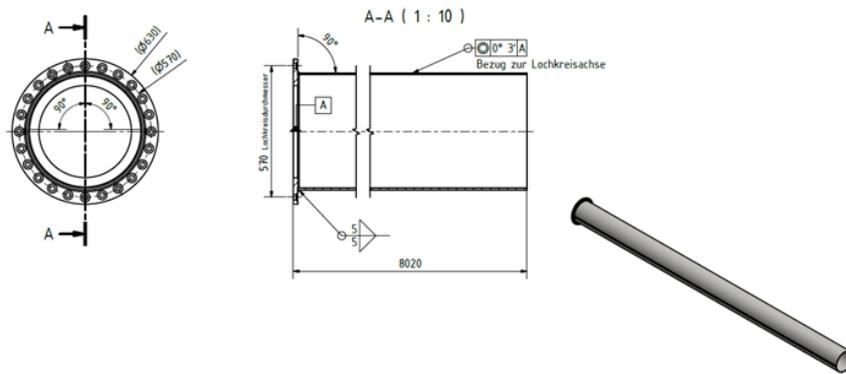


Fig. 30: Tragrohr

Die Tragarme sollen aus gekantetem mit Öffnungen versehenem Blech gefertigt werden. Der Vorteil der Aussparungen ist die Gewichtsreduzierung, die Einsparungen bei der Verzinkung bewirken und sich auch auf die Auswahl der Antriebe positiv auswirkt. Geplant wurde, die Tragarme paarig zu montieren, wobei der Anschluss an die Tragrohre weder geschweißt noch geschraubt, sondern „nur“ über den Kraftschluss der Tragarmschellen auf das Tragrohr hergestellt werden sollte. Damit sind die Tragarmpositionen individuell auf dem Tragrohr einstellbar, was die Adaption an verschiedene Modulgrößen erheblich erleichtert. Der Nachweis darüber ist ein Punkt des später durchgeführten Verifikationsplans.

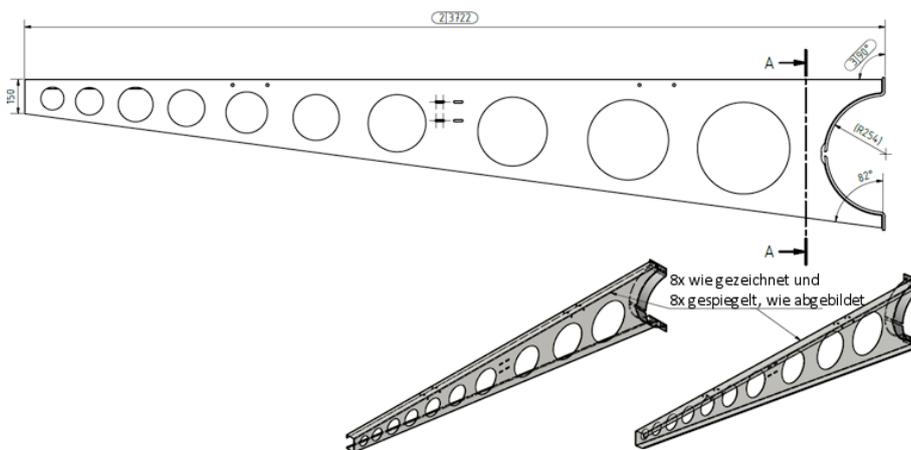


Fig. 31: Tragarme

Auf die Tragarme werden die Modul-Arrays mit je 4 Moduljustage-Böckchen montiert, was wiederum die sonst verwendeten Profilschienen einspart. Das war allerdings nur deswegen möglich, weil der Modulrahmen ausreichend steif war um die anstehenden Kräfte aufnehmen zu können. Dieser Punkt wurde auch während der Verifikationsphase an den Prototypen überprüft.

Als Versteifung zwischen den Tragarmenenden wurden aus C-Profilen gefertigte Querverbinder gewählt, auf die noch zusätzlich eine Modulstütze oder Moduljustage montiert werden sollte.

## 4 AP 4.2 und 4.3 : Antriebs- und Anschlussauslegung

Bei der Auswahl eines geeigneten Antriebskonzeptes, inklusive der Antriebsmotoren und Getriebeeinheiten waren viele Randbedingungen zu berücksichtigen, die mittels eines Lasten-Pflichtenheftes mit den in Frage kommenden Lieferanten diskutiert worden sind. Es galt das bestmögliche Konzept zu einem für uns günstigen Preis –Leistungsverhältnis zu evaluieren, da relativ schnell klar war, das gerade die Antriebe eine der kostenintensivsten Bauteile sein würden.

### Nennbetriebsart

Die DIN EN 60034-1 VDE 0530 –„Drehende elektrische Maschinen“ unterscheidet 10 Betriebsarten (S1 bis S10). Die hier gewählte Betriebsart S9 spiegelt die an einem Nachführsystem vorkommende Lastart wider, bei der auch häufig Überlastungen auftreten können, die auch weit über Volllast liegen dürfen. Unten stehende Figur zeigt im oberen Diagramm exemplarisch mögliche auftretende Schwankungen des erforderlichen Drehmoments - die daraus resultierenden Lasten für den Antrieb werden im unteren Diagramm veranschaulicht.

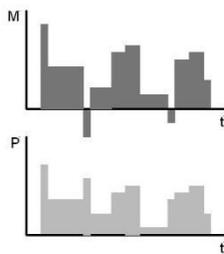


Fig. 32: M-P- Diagramm für Nennbetriebsart S9

### Abtriebsdrehzahl

Die Abtriebsdrehzahl gibt die maximal benötigte Verfahrgeschwindigkeit des Nachführsystems an. Diese wird insbesondere für die Verfahrung in der Elevation während eines sicherheitsrelevanten Ereignisses (z.B. anliegender Wind ist oberhalb von 14 m/s) benötigt. Diese spezielle Verfahrung wird auch „overdrive“ genannt und wird im Kurzzeitbetrieb durch das Anlegen der doppelten Spannung erreicht.

### Massenträgheitsmoment

Das Massenträgheitsmoment ist eine relevante Größe für Antriebe und wird für die Bewegung der Trackermasse in Elevation in Bezug auf die Achse längs der Tragrohre, also der Drehachse  $y$  angegeben. Für die Bewegung in Azimut müssen noch zusätzlich die unterschiedlichen Modulstellungen in Elevation betrachtet werden, da sich das Massenträgheitsmoment damit ändert. Die Drehachse des Schwenktriebs ist hierbei die  $z$ -Achse, also entlang des Mastes, wie in unten stehender Abbildung zu sehen ist.

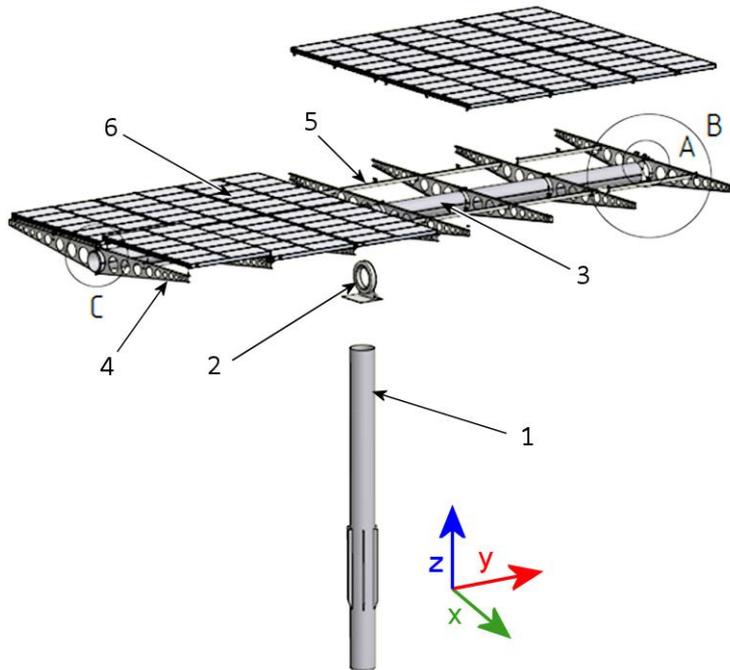


Fig. 33: Nachführsystem mit Bezugssystem

### Spielfreiheit

Durch ein mechanisches Spiel in den Antrieben, hervorgerufen z.B. durch Passungenauigkeiten in den Getrieben kann die genaue Positionierung des Trackers herabgesetzt werden. Darüber hinaus kann ein zu hohes Spiel in Kombination mit Wind zu einem erhöhten Verschleiß der Antrieb führen, deswegen wird die Spielfreiheit des Antriebs, also die maximal tolerierte Passungenauigkeit, auf  $0,03^\circ$  festgesetzt.

### Verfahrenschrittweite

Als hinreichende Schrittweite, sowohl für den Antrieb in Azimut als auch in Elevation ist ein Wert von  $\leq 0,03^\circ$  definiert, der auch Verfahrengenauigkeit der Antriebe genannt wird. Diese hohe Genauigkeit ist nötig, um die spezifizierte Nachführgenauigkeit des kompletten Systems gewährleisten zu können.

### Schmierfett

Um einen möglich wartungsarmen Tracker anbieten zu können, wurde ein Langzeitschmiermittel für den Schwenktrieb favorisiert. Dieses ist zwar in der Investition wesentlich teurer als Standard-Schmiermittel, aber die positive Kosten-Leistungsbilanz lässt sich aufgrund der längeren Wartungszyklen sehr gut darstellen.

Aus diesen hier nur angerissenen Anforderungen ergibt sich folgendes Profilbild des Antriebs: relativ großes Drehmoment zum Bewegen der Lasten bei gleichzeitig benötigter hoher Verfahrensgeschwindigkeit, auch um den Tracker in die Sicherheitsposition verfahren zu können (overdrive). Laut Lasten-Pflichtenheft muss der Tracker bei zum Beispiel einem Windereignis den CPV-Generator innerhalb von 10min in die Sicherheitsposition verfahren. Aufgrund der Tracker-Geometrie wurde von Anfang an ein sogenannter Dual-Axis Drive favorisiert, also ein Schwenktrieb mit 2 Bewegungsachsen. Der Vorteil gegenüber 2 einzelnen Schwenktrieben liegt darin, dass kein weiterer Adapter als Anbindung benötigt wird, was den Montage- und den Materialaufwand erheblich reduziert.

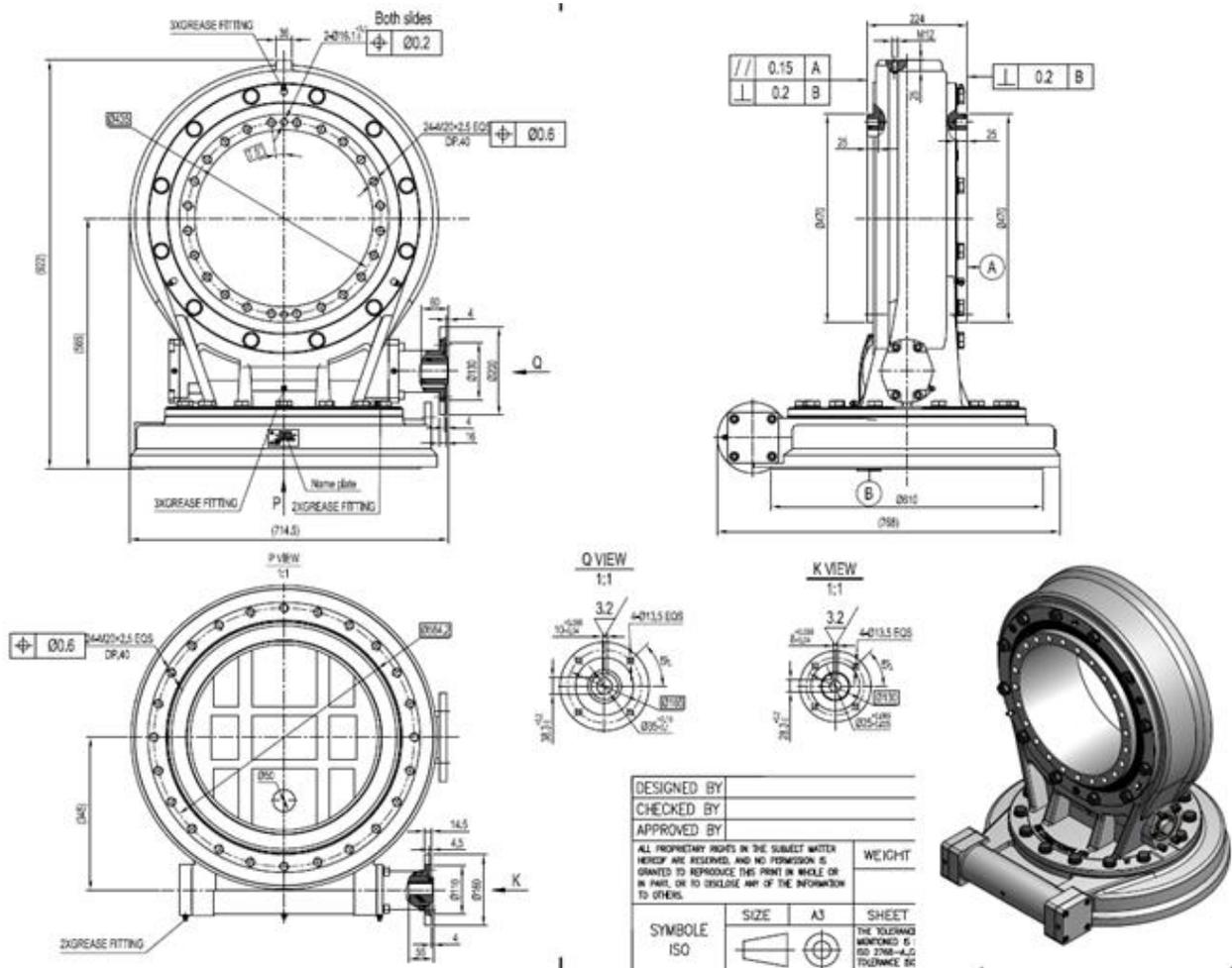


Fig. 34: Dual-Axis drive, Schnittzeichnungen

Mehrere Lieferanten wurden auf der Suche nach einem passenden Dual-axis drive kontaktiert und aufgrund des Lasten-Pflichtenheft wurde der DAD 8 der Firma TGB ausgewählt und ein Muster zur Erstmusterprüfung bestellt.

Für die Anschlussauslegung, also die Motor-Getriebe Einheit, hatten wir uns nach Rücksprache mit Soitec dazu entschlossen, uns für die, bereits bei uns für das Standard PV-System etablierte, DC Variante zu entscheiden. Der Vorteil darin lag in der bereits bestehenden Kommunikations-Infrastruktur und dem ebenfalls vorhandenen Sicherheitskonzept, welches an das CPV-Nachführsystem angepasst wurde.

An den beiden errichteten Prototypen wurden unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich der eingesetzten Motor-Getriebe Einheiten getestet.

Bei dem 2. Prototyp wurde auf eine Standard Motor-Getriebe Einheit zurückgegriffen, mit dem Vorteil, dass sich die benötigte Verfahrzeit im overdrive um 2 Minuten von 10 auf 8 Minuten verringerte. Allerdings zeigte sich bei Einsatz einer 12 VDC Variante



Fig. 35: Dual-Axis drive mit Motor-Getriebe Einheiten

recht schnell, das die Motoren an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit arbeiteten, was auch gut an den Stromwerten ablesbar ist. Deswegen wurde erneut gewechselt und eine 24 VDC Variante mit gleicher Unterersetzung eingesetzt. Nun waren die Stromwerte deutlich reduziert bei gleicher Performance. Eine weitere angedachte 48 VDC Lösung wurde aufgrund der im Langzeittest ermittelten guten Daten nicht weiter verfolgt.

Um eine genaue Positionsbestimmung in Relation zum Sonnenstand zu ermöglichen, wurden berührungslos messende Encoder verwendet, die sowohl die Motorumdrehungen als auch die Motordrehrichtung erfassen und an die Steuerung als Rückmeldung ausgeben. Dieses bereits an den Standard PV Systemen eingesetzte System erwies sich auch hier als probat und wurde beibehalten.

## 5 AP 4.4 und 4.5: Ansteuerung und Trackingalgorithmus

KSG und Firma Soitec haben verschiedene Ansteuerungsarchitekturen diskutiert und die jeweiligen Erfahrungen dazu ausgetauscht. Daraus wurden die Arbeiten bei KSG und Soitec in diesem Arbeitspaket abgeleitet. Wesentlicher Gesichtspunkt war hierbei die Auswahl des Motortyps, DC- oder AC-Motoren, da die Motorauswahl die Entwicklung einer Ansteuerung wesentlich beeinflusst. KSG hatte bereits Erfahrungen mit DC-Motoren und einer damit vorhandenen Steuerung, die mittels eines astronomischen Trackingalgorithmus die Motoren ansteuert. Diese Steuerung wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes zu einer Hybrid-Steuerung mit optischem Sensor weiterentwickelt.

### 5.1. Sicherheitsfunktionen

Die integrierten Sicherheitsfunktionen bewirken zum einen den weitestgehend störungsfreien Automatikbetrieb und zum anderen, bei sicherheitsrelevanten Ereignissen, das Verfahren und anschließende Verbleiben des Nachführsystems in der stabilen Schutzposition. Das Worst Case Szenario für ein Nachführsystem ist ein anliegender Winddruck oberhalb des für den Automatikbetrieb zulässigen Windes. In der Schutzposition bietet der Tracker einem anliegenden Wind die geringstmögliche Angriffsfläche und kann somit wesentlich höheren Winddrücken standhalten. In der Spezifikation wurde zusammen mit Soitec zunächst festgelegt welchen Windstärken das Nachführsystem während des Automatikbetriebs standhalten muss und anschließend in der Konstruktionsphase die Tracker-Geometrie mittels der durchgeführten FEM darauf ausgelegt.

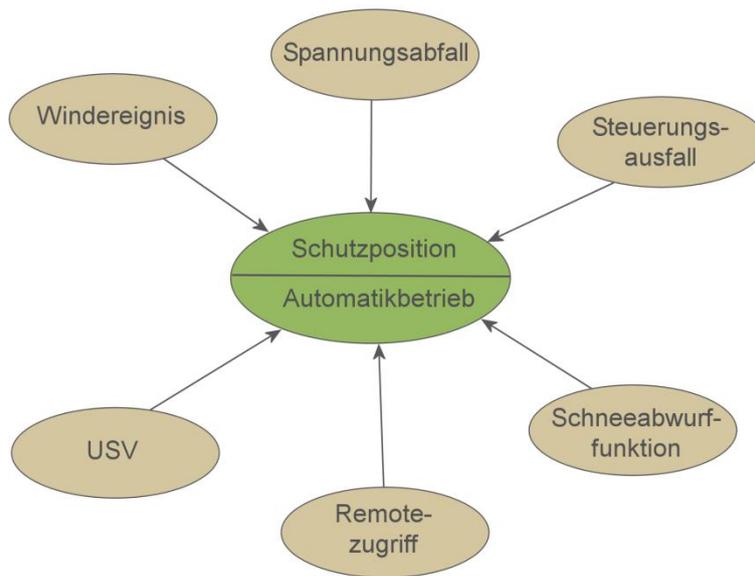


Fig. 36: Sicherheitsfunktionen

Zur Erfassung der Windgeschwindigkeiten wurde ein am Tracker montiertes Anemometer verwendet. Falls Windgeschwindigkeiten oberhalb der als Grenzwert festgelegten 14m/s auftreten, wird die Verfahrungsrichtung in die Schutzposition ausgelöst. Grundlegend notwendig für die Einhaltung dieser Sicherheitsfunktion ist eine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung und, im Falle eines zu großen Spannungsabfalls im backup-System, ebenfalls das Anfahren der Schutzposition. Realisiert wird dieses mittels eines Spannungswächters, der ständig Soll- und Ist-Werte überprüft und ab einem vordefinierten Wert die Verfahrungsrichtung in die Schutzposition initiiert. Diese Sicherheitsfunktionen sind unabhängig von der Steuerung ausgelegt, so dass selbst ein Ausfall der Steuerung nicht zum direkten Sicherheitsrisiko wird. Sicherlich sind auch hier eventuell noch Szenarien denkbar, die eine weitere Verbesserung dieses Systems erforderlich machen. Beispielsweise könnte über eine andere Schutzposition in Abhängigkeit der Geländetopologie nachgedacht werden, die entstehende Aufwinde und Verwirbelungen berücksichtigt. Dieses müsste dann, je nach Installationsort, individuell betrachtet werden.

Das System ist selbstüberwachend und gibt anhand der voreingestellten Default-Werte für die möglichen auftretenden Fehler entsprechende Fehlermeldungen sowohl visuell an der Steuerung, als auch via Internet aus. Diese können per Remote-Zugriff analysiert und gewartet werden und ermöglichen so eine schnelle Fehlerbehebung. Überwachte Parameter sind zum Beispiel die aktuelle Position des Trackers in Azimut und Elevation und die Stromwerte der Motoren. Weicht die Ist-Position von der internen Sollposition um einen voreingestellten Wert  $x$  ab oder befindet er sich gar außerhalb des zulässigen Verfahrbereichs, so wird eine Fehlermeldung initiiert und je nach Schweregrad des Fehlers das System gestoppt.

					Devices	Detection	Settings
					Update		
9	FixedAzimuth	-179	179	0		deg	
10	FixedCleanPos	0	1	0			
11	FixedElevation	0	82	0		deg	
12	LocCoordLat	-65	65	51.04		deg	
13	LocCoordLong	-180	180	9.66		deg	
14	Night-Elevation	0	82	45		deg	
15	Password	0	9999999	302387206			
16	RefErrMax	2	48	2			
17	RefTimeMax	0	99	7		d	
18	Remote			16: QUIT_REMOT			
19	RemoteStep	0	45	0		deg	
20	SensBackX	250	2000	300		rot	
21	SensBackY	800	4000	1200		rot	
22	Serial Number			152003166			
23	StartDelay	0	1000	2		s	
24	TrkDiffMin	0.1	3	0.1		deg	
25	TypeSelect	1	10	1			

Save for all devices of this device type

Fig. 37: Überwachte Parameter, Auszug

Zusätzlich zu den in der Software integrierten Endschaltern für den Azimut- und den Elevationsbereich werden Positionsschalter am Nachführsystem installiert, die direkt die Motoren und somit die Verfahrensbewegung stoppen, noch bevor der Software-Endschalter erreicht ist.

Damit die zulässige Traglast des Systems nicht durch Schneeablagerungen überschritten wird, wurde eine sogenannte Schneewurffunktion integriert, wobei die Modulfläche in einem geeigneten Elevationswinkel von  $> 50^\circ$  angestellt wird.

## 5.2. Hybridsteuerung und Trackingalgorithmus

Die Hybrid-Steuerung besteht aus dem open loop Regelkreis mit astronomischem Trackingalgorithmus und eines zusätzlich eingesetzten optischen 4 Quadranten Sensors, den sogenannten HyTrack, der die Feinjustierung des Nachführsystems übernimmt. Mit dem astromoischen Algorithmus wird unter Berücksichtigung des Standortes, des Datums und der Uhrzeit der Sonnenstand bestimmt. Dieser wird in einem Höhenwinkel (Elevation) und in einem Horizontalwinkel (Azimut) ausgegeben.

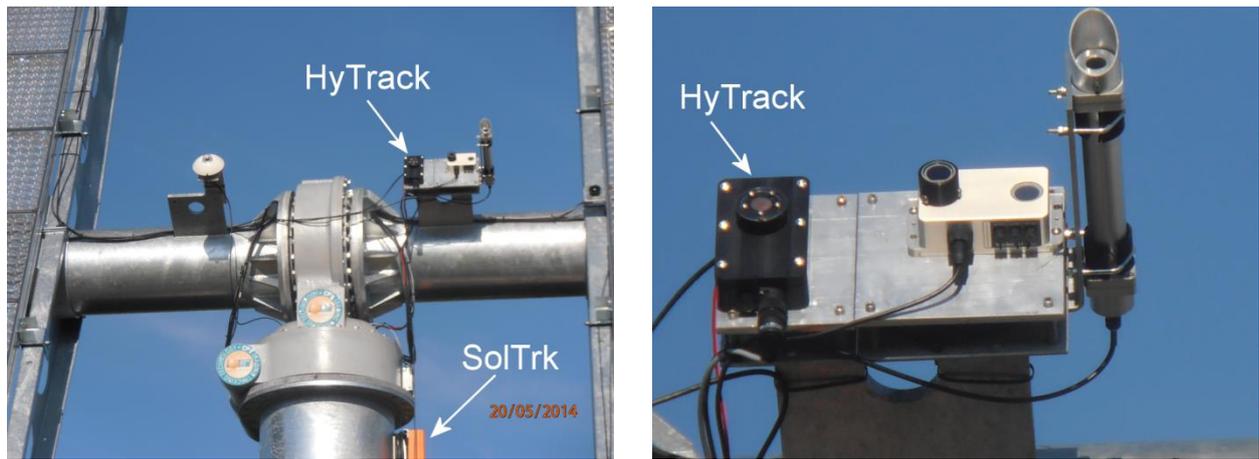


Fig. 38: Hytrack und Steuerung SolTrk am Testtracker

Der optische Sensor HyTrack wurde so am System installiert, dass er stets parallel zur Modulfläche ausgerichtet ist. Das heißt bei maximaler Signalstärke des Sensors trifft der Sonnenstrahl exakt den Wafer der Solarzelle und der Energieertrag wird maximal. Eine der Schwierigkeiten dabei war und ist, den Sensor exakt auszurichten. Dieses sollte möglichst einfach und kostengünstig realisiert werden und auch unter den häufig erschwerten Bedingungen auf den Baustellen einsetzbar sein. Die Ausrichtung erfolgte direkt am System im Automatikbetrieb, so dass das Nachführsystem bereits mithilfe des Hytracks gesteuert wurde. Der Sensor ist auf einer mit 3 Schrauben justierbaren Platte installiert, und somit in 3 Freiheitsgraden verstellbar. Über eine visuelle Kontrolle des Lichteinfalls auf den Wafer einer Solarzelle wird der Sensor nun solange mittels der justierbaren Platte ausgerichtet, bis der Sonnenstrahl direkt den Wafer trifft. Immer unter der Voraussetzung, dass die Sonne scheint - was für Installationen während einer Schlechtwetterperiode nicht probat ist und auch hierfür noch eine Lösung gefunden werden muss. Dieses Vorgehen ist relativ simpel, birgt aber das Risiko der Fehlausrichtung; z.B. ist vorstellbar, dass der Lichtstrahl nicht gänzlich zentriert ist und somit bereits hier ein Fehlwinkel generiert wird. Weitere Installationen werden zeigen, inwieweit hier die Vorgehensweise verfeinert werden kann oder muss.

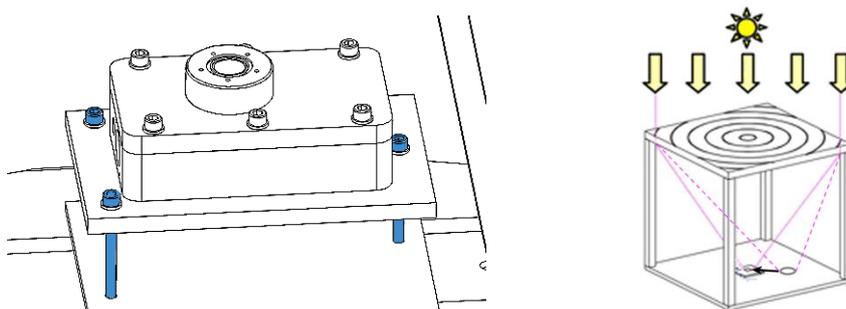


Fig. 39: Ausrichten des Hytracks

## 6 AP 4.6: Verteilung der Kräfte zwischen Modul und Tracker

Die CPV –Arrays mit den Abmaßen von 3,67 x 2,39 m wurden mit je 4 justierbaren Modulhaltern, wobei sich jeweils 2 auf der Längsseite befinden mit der Tragstruktur verbunden. Zusätzlich wurde das Array in der Mitte von einem feststehenden Halter unterstützt. Die Dimensionierung der Halter erfolgte mittels einer FEM und wurde so ausgeführt, dass die auftretenden Kräfte sicher auf die Tragstruktur übertragen werden können. Wichtig hierbei sind eventuell auftretende (Fehl-) Belastungen die zu Dejustage der Arrays und im schlimmsten Fall dazu führen, dass sich die Arrays außerhalb des vorgegeben Akzeptanzwinkels befinden würden. Dieses hätte einen außerplanmäßigen, kostenintensiven Wartungseinsatz und Ertragseinbußen zur Folge.

Der Transport und das Absetzen der Arrays auf dem Nachführsystem erfolgte mithilfe eines handelsüblichen Vakuumhebers, wie in unten stehender Abbildung zu sehen ist.

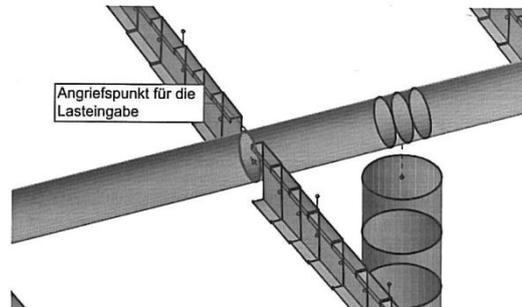


Fig. 40: Modulmontage mittels Vakuumheber

Anschließend wurden diese montiert und mithilfe eines Rotationslasers (siehe auch Kapitel 7.1.4“Moduljustage“ auf Seite 42) ausgerichtet. Aus Langzeitmessungen (siehe auch Kapitel 8 „Verifikation Hybridsteuerung und Trackingalgorithmus“ auf Seite 44) am Tracker konnte geschlossen werden, dass diese Art der Anbindung sehr stabil und die Kräfteverteilung zwischen Modul und Tracker ausreichend ist.

## 7 Verifikation Tracker-Geometrie incl. Antriebskomponenten

Die Verifikation der Stahlkonstruktion erfolgte im ersten Schritt durch die Erstellung der Musterstatik durch ein externes Statikbüro. Dabei wurden auch das vorgesehene Fundament und die Anbindung des Mastes berechnet. Als Traglast für das System wurden die von Soitec angegebenen Modulabmessungen und Gewichte angesetzt. Die Statik wurde entsprechend den für die Sensitivitätsanalyse angesetzten Lastfällen erstellt und ergab eine gute Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen aus der FEM. Nachstehende Abbildung zeigt exemplarisch die Berechnungsgrundlagen für den Nachweis des Tragrohrs aus der Musterstatik.

**Beanspruchung für Anschluss:**


Einwirkung	N <sub>x</sub> [kN]	Q <sub>y</sub> [kN]	Q <sub>z</sub> [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
<b>0°-Stellung</b>						
Ständig	≈ 0,0	0,0	29,1	0,0	0,0	0,0
Schnee	≈ 0,0	0,0	24,5	0,0	0,0	0,0
Wind x (Sog/Druck)	≈ 0,0	0,0	-87,8/13,4	0,0	-216,0/33,0	0,0
Wind y (Sog/Druck)	≈ 0,0	0,0	-50,4/7,7	140,70/21,5	-102,8/15,7	0,0
<b>85°-Stellung</b>						
Ständig	≈ 0,0	0,0	29,1	7,6	56,8	0,7
Wind (LF3)	≈ 0,0	17,5	1,53	19,5	3,11	35,6
Wind (LF4)	≈ 0,0	30,4	2,70	0,0	6,6	74,7
Wind (LF5)*	≈ 0,0	34,9	3,05	39,1	6,2	71,1
Wind (LF6)*	≈ 0,0	60,8	5,31	0,0	13,1	149,5

\*Außergewöhnliche Bemessungssituation

Fig. 41: Ausschnitt aus der Musterstatik

Zur Verifikation sämtlicher Stahlbaukomponenten wurde ein Prüfplan festgelegt, nach dem die einzelnen Bauteile nach Wareneingang und schrittweise während der Montage geprüft wurden. So konnten auftretenden Fehler oder Passungenauigkeiten frühzeitig erkannt und korrigiert werden. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Montage- und Wartungsfreundlichkeit des Systems, die während des Errichtens der Prototypen überprüft wurde. Dazu zählen neben den erforderlichen Mann-Stunden auch die Fahrzeugstunden und die Bereitstellung der Infrastruktur, wie zum Beispiel Straßenbefestigungen für schwere Baustellenfahrzeuge oder Kommunikations- und Netzanbindungen.

## 7.1. Bauteile Prüfung

Neben den Standardmessungen in der Wareneingangskontrolle wurden verschiedene Tests bezüglich der Einsatztauglichkeit durchgeführt. Insbesondere wurde die Verbiegung unter Eigenlast und Belastung der großen Komponenten evaluiert.

### 7.1.1. Tragarme

Um eine möglichst große Flexibilität hinsichtlich verschiedenen Modulgrößen und -typen zu erreichen, wurde eine rein klemmende Verbindung zwischen den Tragrohren und den Tragarmen gewählt. Dadurch können die Tragarme frei auf dem Tragrohr verschoben werden und an unterschiedliche Modulmaße angepasst werden. In ersten Versuchsaufbauten wurde überprüft, ob die Klemmkraft der Tragarmschellen auf den Tragrohren ausreichend ist, und ob die zusätzlich angedachte Verdrehsicherung nötig ist.



Fig. 42: Flexible Positionierung der Tragarme auf dem Tragrohr

Dazu wurde eine Versuchsvorrichtung konstruiert, in die ein kurzer Tragrohrstummel eingespannt wurde. Anschließend wurde ein Tragarmpaar über Schraubverbindungen auf das Tragrohr geklemmt. Der gegenüberliegende Tragarm wurde ebenfalls verkürzt ausgeführt.

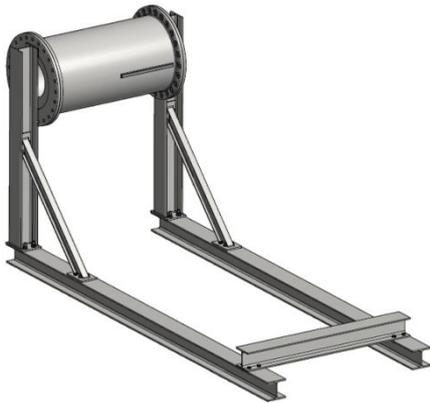


Fig. 43: Vorrichtung mit Tragrohrstummel



Fig. 44: Versuchsablauf

Aus den FEM Berechnungen ergaben sich aus den maximal auftretenden Windlasten und damit auftretenden Drehmomenten die hier angesetzten Lasten, inklusive eines Sicherheitsfaktors, auf den Tragarm. Getestet wurde, ob sich der Tragarm unter dieser Last auf dem Tragrohr verdreht oder sogar löst.

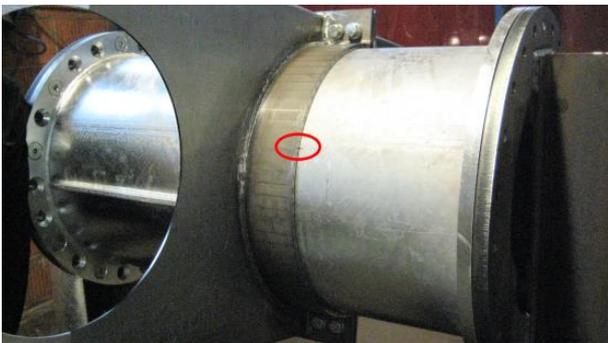


Fig. 45: Verdrehung Tragarm auf Tragrohr

Als Ergebnis der Versuchsreihen bleibt festzuhalten, dass zu einen die reine Klemmkraft der Tragarmschellen ausreichend ist und auch eine zusätzliche Verdrehsicherung nicht notwendig ist

### 7.1.2. Tragrohre

Ein weitere Prüfpunkt, der als integraler Bestandteil des Erstmusterprüfberichts auch als Abnahmebestätigung gegenüber dem Lieferanten gilt, ist das Bending, also die Durchbiegung der Tragrohre unter Eigenlast und unter Lastbedingungen. Dazu wurden die Tragrohre mit dem Dual-Axis Drive verbunden und die jeweilige Durchbiegung gemessen. Die unten stehenden Abbildungen zeigen die Versuchsanordnung.

Erstmusterprüfbericht first article identification report Prüfergebnis / results		
KSG Produktion		
Lieferant / supplier		
Sachnummer/Benennung / part number / designation		
Tragrohr mit angeschweißten Flansch		
Pos.	Merkmal / Sollwert Characteristic / face value	
1	Zeichnungskonforme Anbringung des Flansches zum Rohr 90°	
2	Zeichnungskonforme Ausführung der Schweißnaht	
3	Durchhang des Tragrohrs im montierten Zustand ohne Last max. 3,8mm / 0,035°	
4	Durchhang des Tragrohrs im montierten Zustand mit Last von 1,3 t am Ende des Rohrs max. 22mm / 0,2°	

Fig. 46: Auszug aus Erstmusterprüfbericht



Fig. 47: Durchbiegung Tragrohre



Fig. 48: Zugvorrichtung

Die Messungen ergaben sowohl für das Bending unter Eigenlast als auch unter Last die Einhaltung der vorgeschriebenen Werte. Darüber hinaus hat sich die Lage der Schweißnaht an der nach oben weisenden Seite des Rohrs als vorteilhaft herausgestellt und wurde in der Fertigungszeichnung so festgelegt.

### 7.1.3. Evaluierung von Passgenauigkeit und Montagefreundlichkeit

Während des Aufbaus der Prototypen wurden Tests zur Passgenauigkeit und die Montagefreundlichkeit durchgeführt. Insbesondere geprüft wurde auch die Vorgehensweise zur Ausrichtung der Stahlkomponenten um das durch die Fertigung und Montage bedingte Durchbiegen der Unterkonstruktion unter Eigenlast zu vermindern. Außerdem wurde untersucht, ob die Vorrichtung zur Moduljustage den Anforderungen entspricht. Ziel war es die Modulfläche möglichst ohne Abweichungen in 0°, also waagrecht auszurichten.



Fig. 49: Setzen des Masts



Fig. 50: Mast in Waage ausrichten

Vorgabe war den Mast mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 0,1^\circ$  aus der Waagrechten zu setzen, was mithilfe der 3 Spanngurte, die auch gleichzeitig als Sicherungen während der Aushärtezeit des Betons dienen, auch mit  $\pm 0,05^\circ$  problemlos möglich war.



Fig. 51: Tragrohr montieren



Fig. 52: Tragrohr ausrichten

Nachdem der Dual Axis drive auf dem Montagekreuz vormontiert und in Waage ausgerichtet war, wurden die Tragrohre montiert und unter zu Hilfenahme von Hebeböcken in Waage mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 0,3^\circ$  ausgerichtet.

Die Tragarmmontage und anschließende Ausrichtung gestaltete sich als sehr zeitintensiv. Wie man auf den unten stehenden Abbildungen erkennen kann, benötigt man, wenn ohne zusätzliches Equipment gearbeitet wird bis zu 5 Mann, um ein Tragarmpaar zu montieren. Und auch dann erwies es sich als sehr umständlich und ist bei einem Bauvorhaben mit Terminvorgabe nicht vorstellbar.



*Fig. 53: Tragarmmontage 1. Versuch*

Um die bereits angesprochene freie Montageposition der Tragarme nicht zu verlieren, wurde beim nächsten Prototypen zunächst eine andere Vorgehensweise bei der Montage mittels eines Gabelstaplers gewählt. Dieses gestaltete sich aber leider ähnlich aufwändig, wie auf den nachstehenden Bildern zu erkennen ist.



*Fig. 54: Tragarmmontage, 2. Versuch*

Auch die Justage der Tragarme, die als Unterkonstruktion für die Module dienen, war mehr als aufwendig, da sich herausstellte, dass sobald ein Tragarmpaar in Waage war, sich die nächsten auf dem Tragrohr wieder verschoben hatten. Erschwerend hinzu kam, dass pro Tragarmpaar jeweils 8 Schrauben verstellt werden mussten. Als Messequipment zur Justage kam ein auf dem Schwenktrieb ausgerichteter Rotationslaser zum Einsatz, mit dem problemlos die Höhenabweichungen vermessen werden konnten. Dieses simple System kam auch später zur Justage der Module zum Einsatz und war einfach und schnell bedienbar, so dass zu mindestens dieser Punkt als gelöst betrachtet werden kann.



Fig. 55: Tragarmausrichtung mittels Rotationslasers

Im Anschluss wurden mehrere mögliche Tragarmvarianten und eine verbesserte Möglichkeit der Ausrichtung diskutiert. Ein gangbarer Weg wäre statt die Tragarme direkt an die Tragrohre zu klemmen, schon während der Fertigung sogenannte Tragarmadapter an die entsprechenden Positionen aufzuschweißen und bauseits jeweils einzelne Tragarme anzuschrauben. Die Flexibilität wäre dann immer noch gegeben, nur kann dies nicht mehr bauseits entschieden werden, sondern muss in enger Zusammenarbeit mit dem Kunden vorab festgelegt werden. Das hätte eine einfachere und schnellere Montage und auch Justage zur Folge. Mit einer Tragarmlänge von kleiner als 3 m könnten dann auch günstigere Lieferanten gefunden werden, da es im Gegensatz dazu für die vorhergehende Variante nur wenige Spezialfirmen gibt, die Längen über 3 m kanten können.

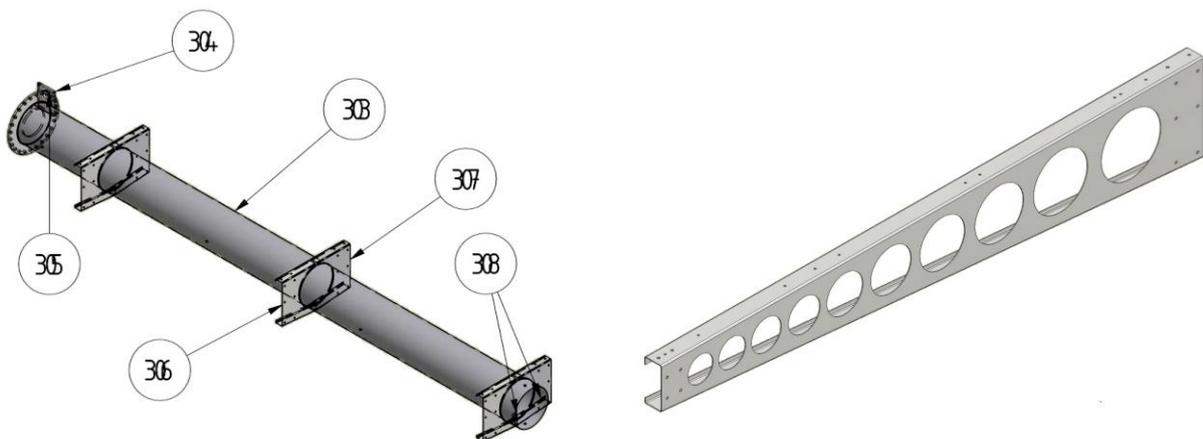


Fig. 56: Geteilte Tragarme mit aufgeschweißten Tragarmadapter und Tragarm

#### 7.1.4. Moduljustage

Zur Moduljustage wurden höhenverstellbare Modulklemmen verwendet. Die Modul-Arrays wurden nacheinander mithilfe des Rotationslasers ausgerichtet. Es stellte sich heraus, dass diese Vorrichtung von den Einstellmöglichkeiten ausreichten, um die durch die Unterkonstruktion entstandenen Ungenauigkeiten hinreichend ausgleichen zu können. Die Modul-Arrays wurden in der waagrechten Position auf 0° eingestellt. Diskutiert wurde ebenfalls die Möglichkeit, einen vom Zentrum nach außen ansteigenden Fehlwinkel einzustellen, damit in der Schrägposition die Modulfläche annähernd ohne Fehlwinkel behaftet ist. Allerdings zeigten die anschließenden Messungen während des Betriebs, dass das Bending der

Stahlkonstruktion ausreichend ausgeglichen worden ist, so dass dieser optionale Ansatz wieder fallengelassen wurde.



*Fig. 57: Testtracker*

Mit dem Aufbau der Prototypen und der durchgeführten Verifikation ist der Meilenstein M 4.3 dieses Arbeitspaketes erfüllt.

## 8 Verifikation Hybridsteuerung und Trackingalgorithmus

Zur Verifizierung des gewählten Tracking-Algorithmus wurden die in nachstehender Abbildung gezeigten Messinstrumente am Nachführsystem installiert:

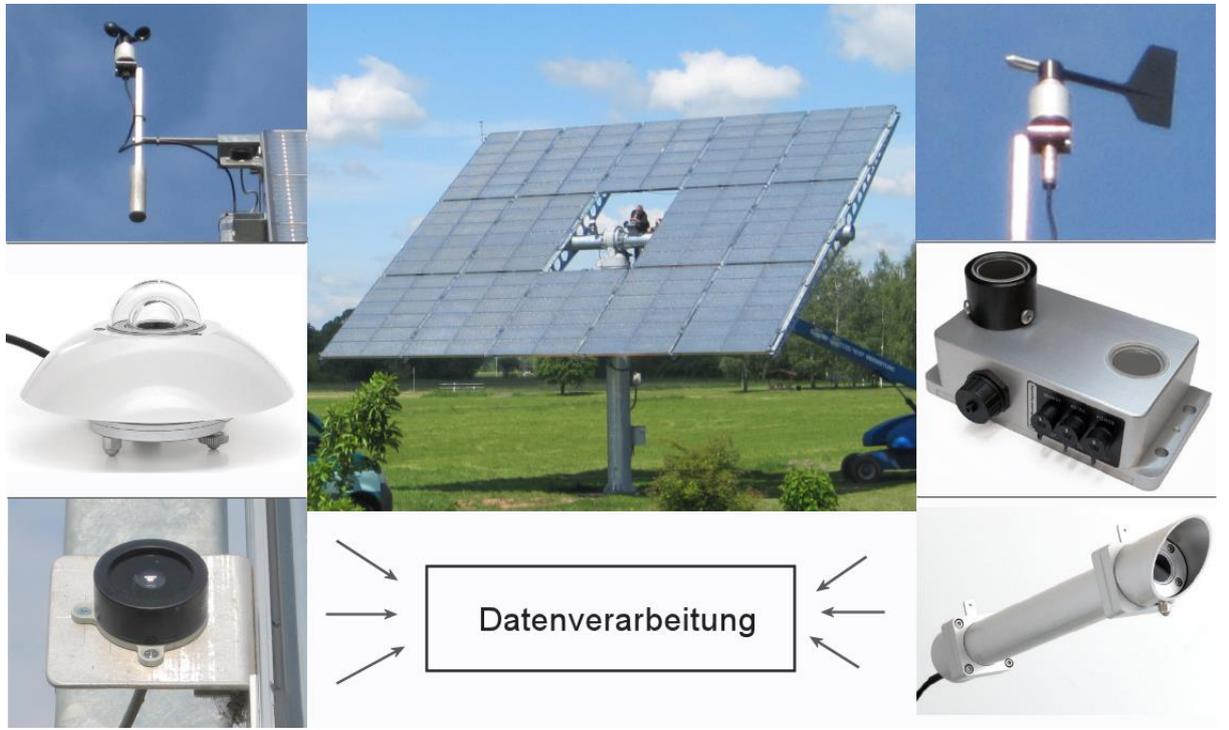


Fig. 58: Installierte Messinstrumente am Tracker

Im Uhrzeigersinn von oben links wurden installiert:

- Anemometer
- Windrichtungsmesser
- Trac-Stat zur Erfassung des Fehlwinkels in Grad
- Pyrheliometer zur Erfassung der direkten Sonneneinstrahlung
- 5 x Solar MEMS zur Erfassung des Fehlwinkels an den Ecken und in der Mitte der Modulfläche
- Pyranometer zur Erfassung der globalen Sonneneinstrahlung

Die Windgeber zur Erfassung der Windstärke und- richtung sind drehbar gelagert und an der oberen Kante der schräg stehenden Modulfläche montiert. Bis auf 4 der 5 Solar MEMS befinden sich sämtliche anderen Messinstrumente in Zentrum der Modulfläche. Dort ist das geringste Bending der Stahlstruktur durch Eigenlast oder Windeinflüsse zu erwarten. Auch der Sensor HyTrack ist dort installiert.

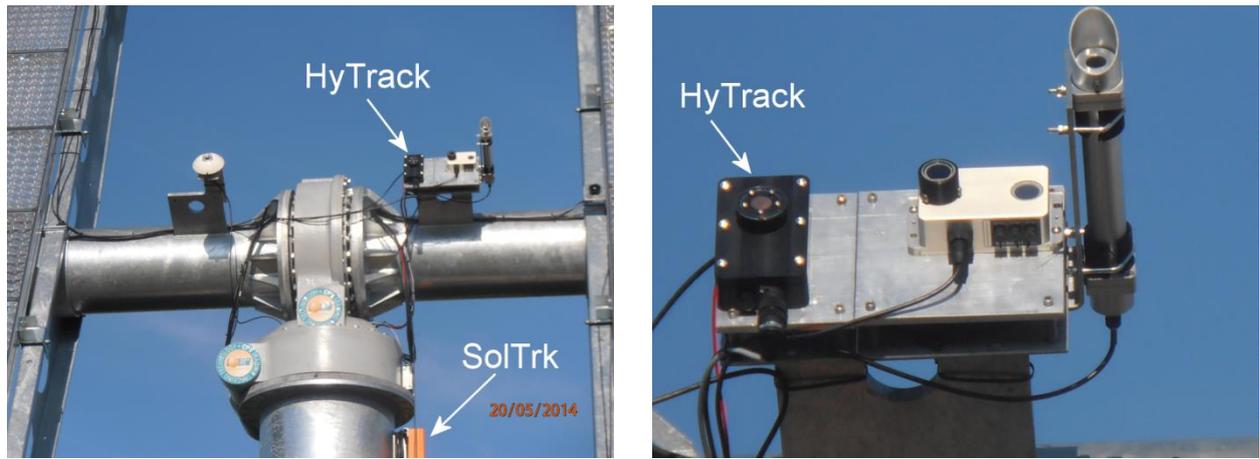


Fig. 59: Hytrack und Steuerung SolTrk am Testtracker

In ersten Messreihen wurde das Trac-Stat verwendet. Allerdings stellte sich rasch heraus, dass dessen Datenübermittlungsgeschwindigkeit mit 12 sec zu langsam war, um die benötigte Verfahrensgeschwindigkeit von  $0,01^\circ / 2,4 \text{ sec}$  korrekt abbilden zu können. Was nur einen relativ groben ersten Einblick bezüglich des Fehlwinkels ermöglichte, wie in Fig. 60 zu sehen ist.

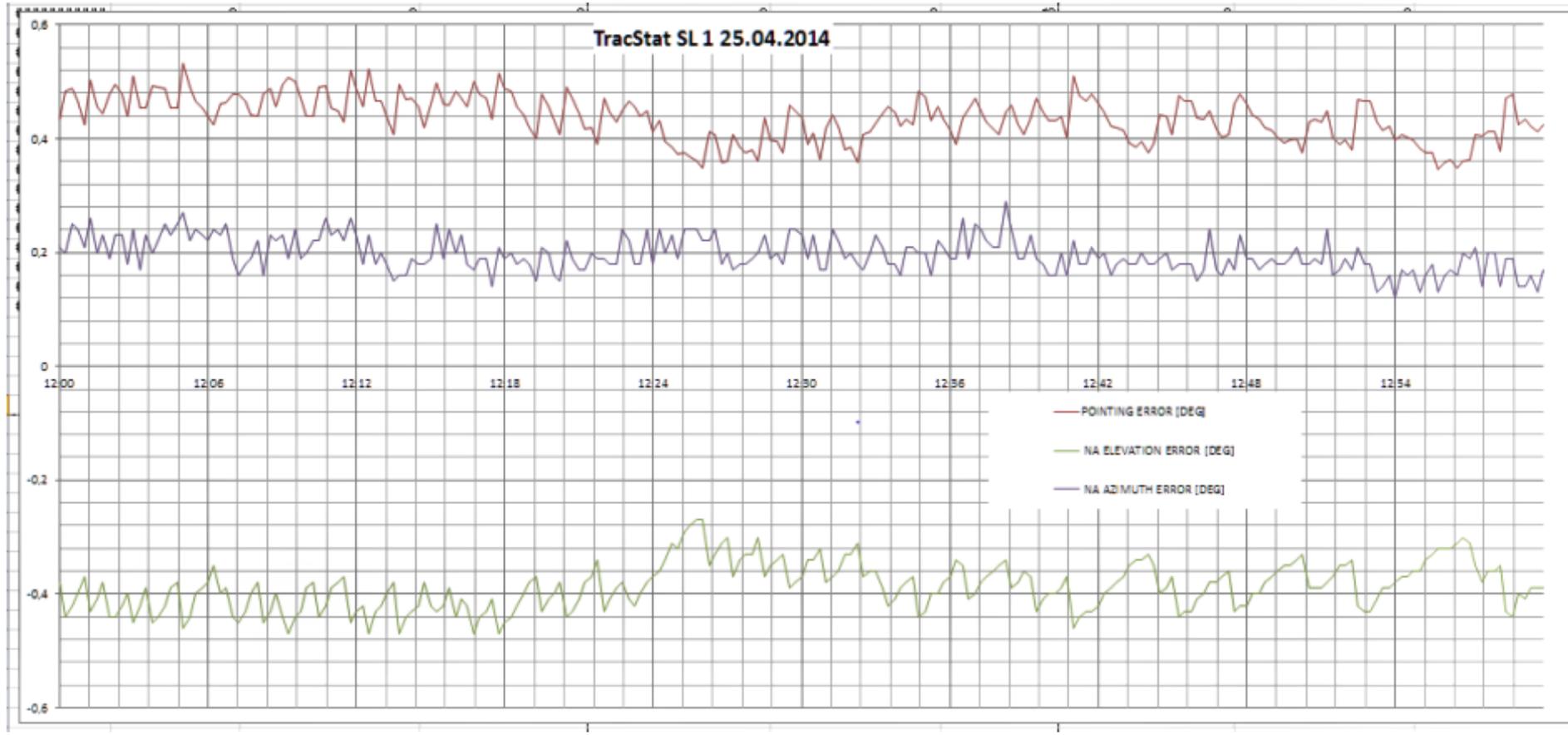
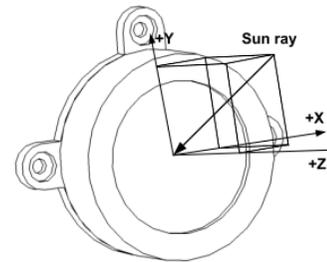
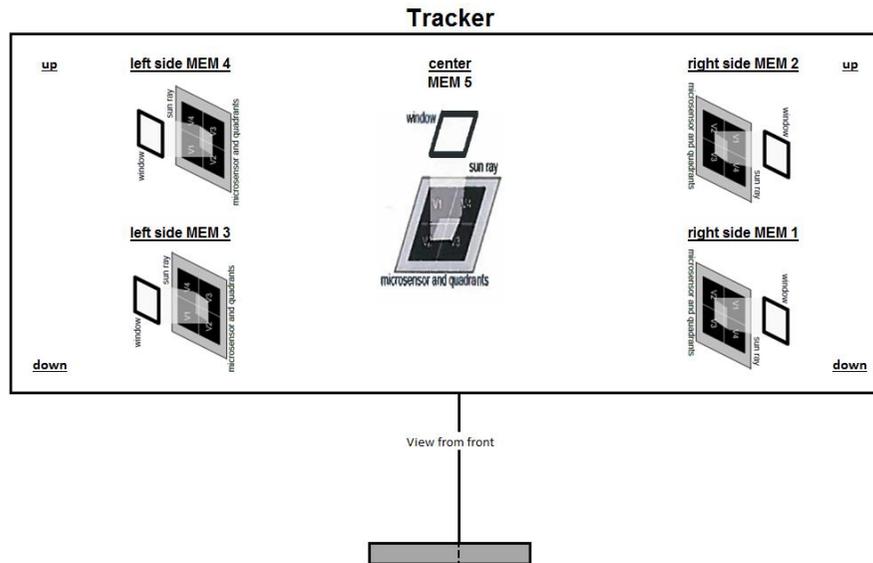


Fig. 60: Messreihe Trac-Stat

Erkennbar ist zunächst, dass die Messwerte für Elevation und Azimut und damit auch der aus den beiden berechnete Gesamtfehlwinkel, mit einem Offset resultierend aus einer Fehlausrichtung des Trac-Stat behaftet sind. Dementsprechend sind hier nur die relativen Abweichungen interessant. Für die Ausrichtung in Azimut beträgt die mittlere Abweichung stets unter  $0,1^\circ$ , was ebenfalls für den Elevationsfehler mit einem Ausreißer gilt und somit für Gesamtfehlwinkel gilt. Unberücksichtigt bleibt hier die Korrelation zur Moduloberfläche und die Fragestellungen inwieweit die Modul-Arrays planparallel zueinander und zum installierten Sensor HyTrack stehen. Dazu wurden die SolarMEMS an den äußeren Modulecken und in der Mitte der Modulfläche installiert, um die Einflüsse durch das Bending in der Stahlstruktur durch eventuelle Setzungserscheinungen und Windeinflüsse erfassen zu können.



$$X_1 = V_{PH3} + V_{PH4}$$

$$X_2 = V_{PH1} + V_{PH2}$$

$$F_X = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1}$$

$$\text{Angle } X = \arctg(C \cdot F_X)$$

$$Y_1 = V_{PH1} + V_{PH4}$$

$$Y_2 = V_{PH2} + V_{PH3}$$

$$F_Y = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1}$$

$$\text{Angle } Y = \arctg(C \cdot F_Y)$$

Type	Value
ISS-A60	1,889
ISS-A25	0,477
ISS-A15	0,273
ISS-A5	0,125

Table 3. Values of the parameter C according to the type of sensor ISS-AX (Geometric Correction)



Fig. 61: Positionen der Solar MEMS und Auswerteverfahren

Die Solar MEMS verwenden den photoelektrischen Effekt und geben als 4 Quadranten Sensor den Fehlwinkel der Modulfläche in Bezug auf den Sonnenstand in Form von Spannungswerten aus.

Die geforderte Trackinggenauigkeit ist in nachstehender Tabelle nochmals aufgeführt und um einige diskrete Werte erweitert worden, auf die in der folgenden Auswertung Bezug genommen wird.

Trackinggenauigkeit	Windgeschwindigkeit [m/s]
± 0,2°	v = 0
0,2° + 0,0179 x Windgeschwindigkeit	0 < v < 14
± 0,27°	v = 4
± 0,33°	v = 7
± 0,38°	v = 10
± 0,43°	v = 13
± 0,45°	v = 14
Sicherheitsposition	14 < v < 22,4

Wie in den Zwischenberichten bereits ausgeführt, stand die Verifikation für hohe Windgeschwindigkeiten noch aus. Da in unseren Breiten hohe Windgeschwindigkeiten in der Regel mit schlechtem Wetter und einer entsprechenden dichten Bewölkung einhergehen, war es relativ schwierig belastbare Messdaten zu erhalten. Im Sommer, bei Sonnenschein und einem klaren Himmel ist der DNI, also der gemessene Wert für die direkte Sonneneinstrahlung, in der Regel größer als ca.  $650 \text{ W/ m}^2$ .

Am hier beispielhaft betrachteten Tag, dem 02.06.2015 betrug der DNI im ausgewerteten Zeitfenster im Durchschnitt  $771 \text{ W/ m}^2$ ; folglich können Einflüsse, wie sie durch zum Beispiel vor der Sonne vorüberziehende Wolken entstehen, in der Auswertung weitestgehend ausgeschlossen werden. Dafür wehte ein frischer Wind mit durchschnittlichen Werten von  $6,5 \text{ m/ s}$  mit Spitzenwerten von über  $13 \text{ m/s}$ . Die Windwerte liegen also im höchstmöglichen Bereich, bevor die Sicherheitsposition angefahren wird. Betrachtet werden die Fehlwinkel in Azimut und Elevation der 5 Solar MEMs, die auf den in Fig. 61 gezeigten Positionen an der Modulfläche installiert sind. Diese erfassen das durch den Wind induzierte Bending der Unterkonstruktion und der Modulfläche. Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse beispielhaft in einem Zeitintervall von ca. einer Stunde zunächst grafisch ausgewertet dargestellt und werden anschließend näher erläutert.

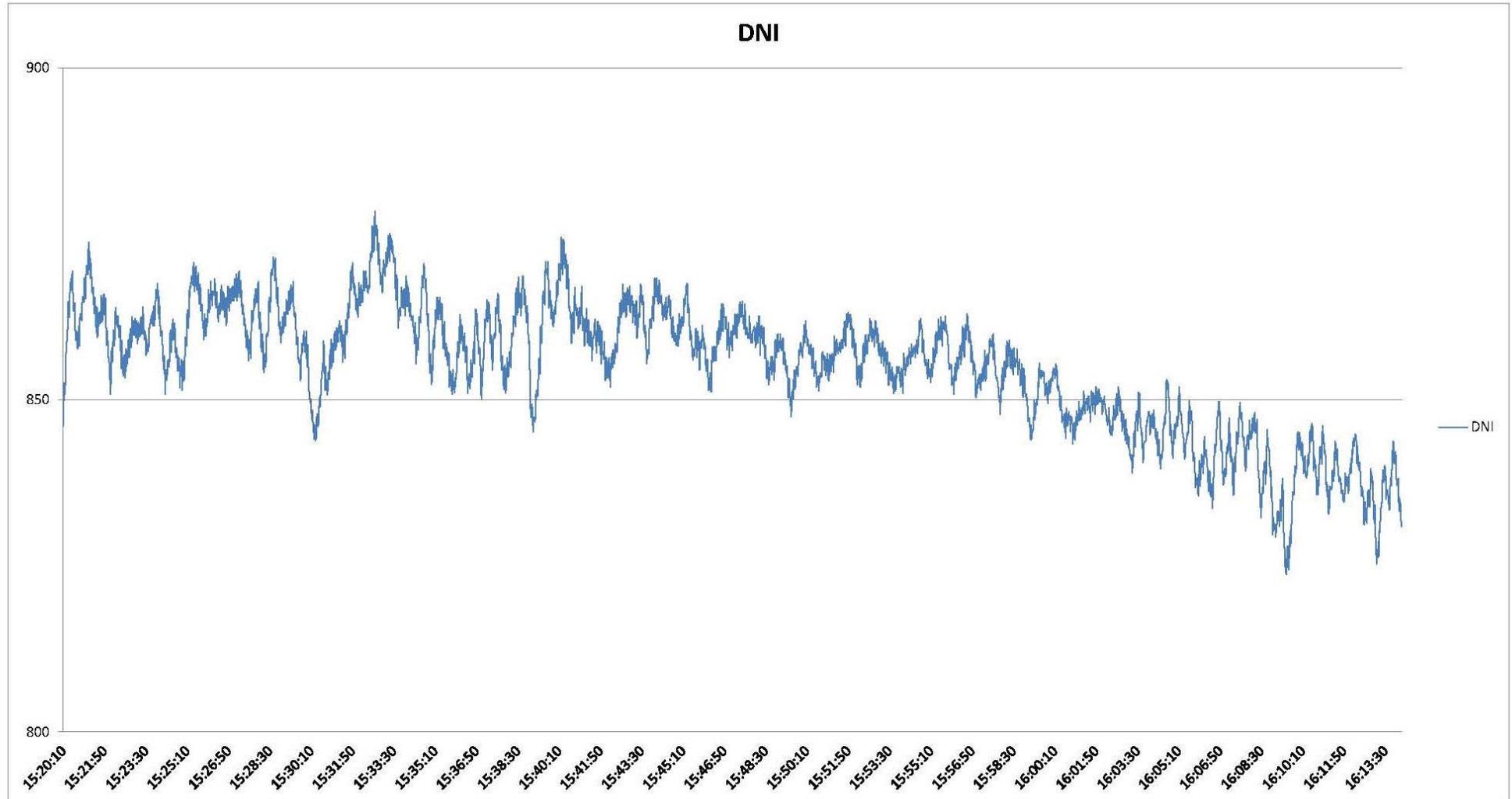


Fig. 62: Direkte Sonneneinstrahlung DNI, erfasst am 02.06.2015

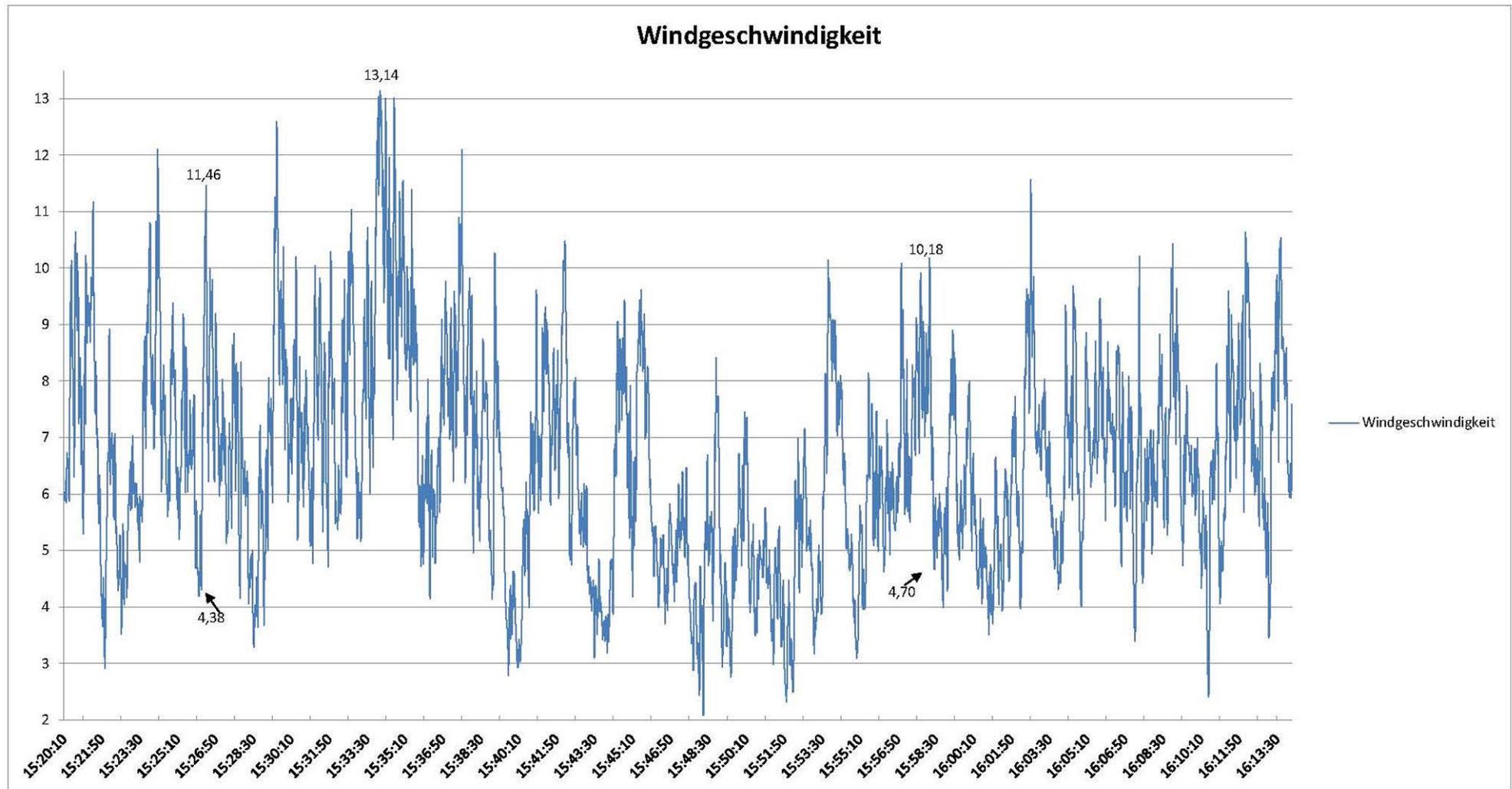


Fig. 63: Windgeschwindigkeiten, erfasst am 02.06.2015

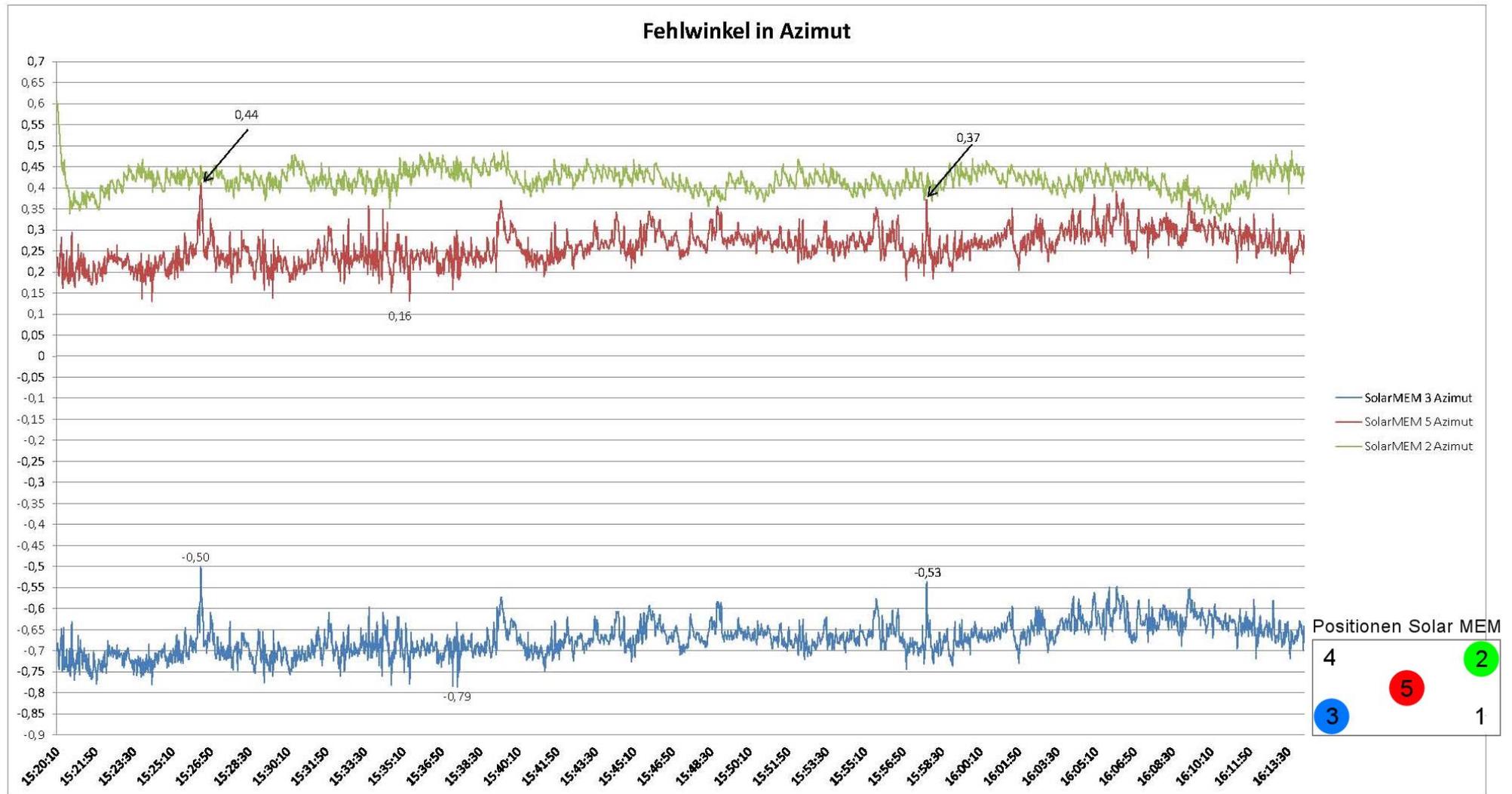


Fig. 64: Fehlwinkel in Azimut, erfasst am 02.06.2015

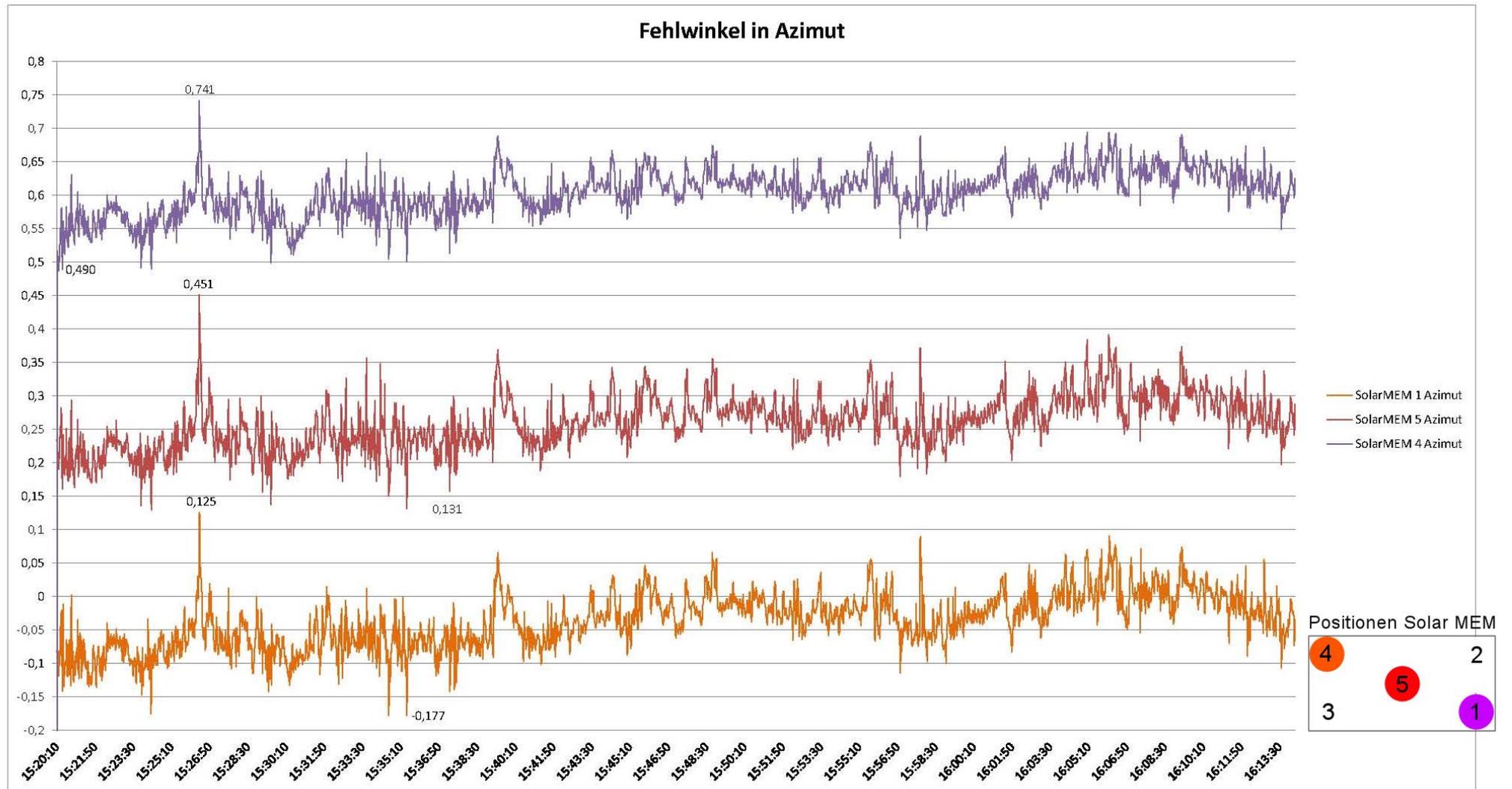


Fig. 65: Fehlwinkel in Azimut, erfasst am 02.06.2015

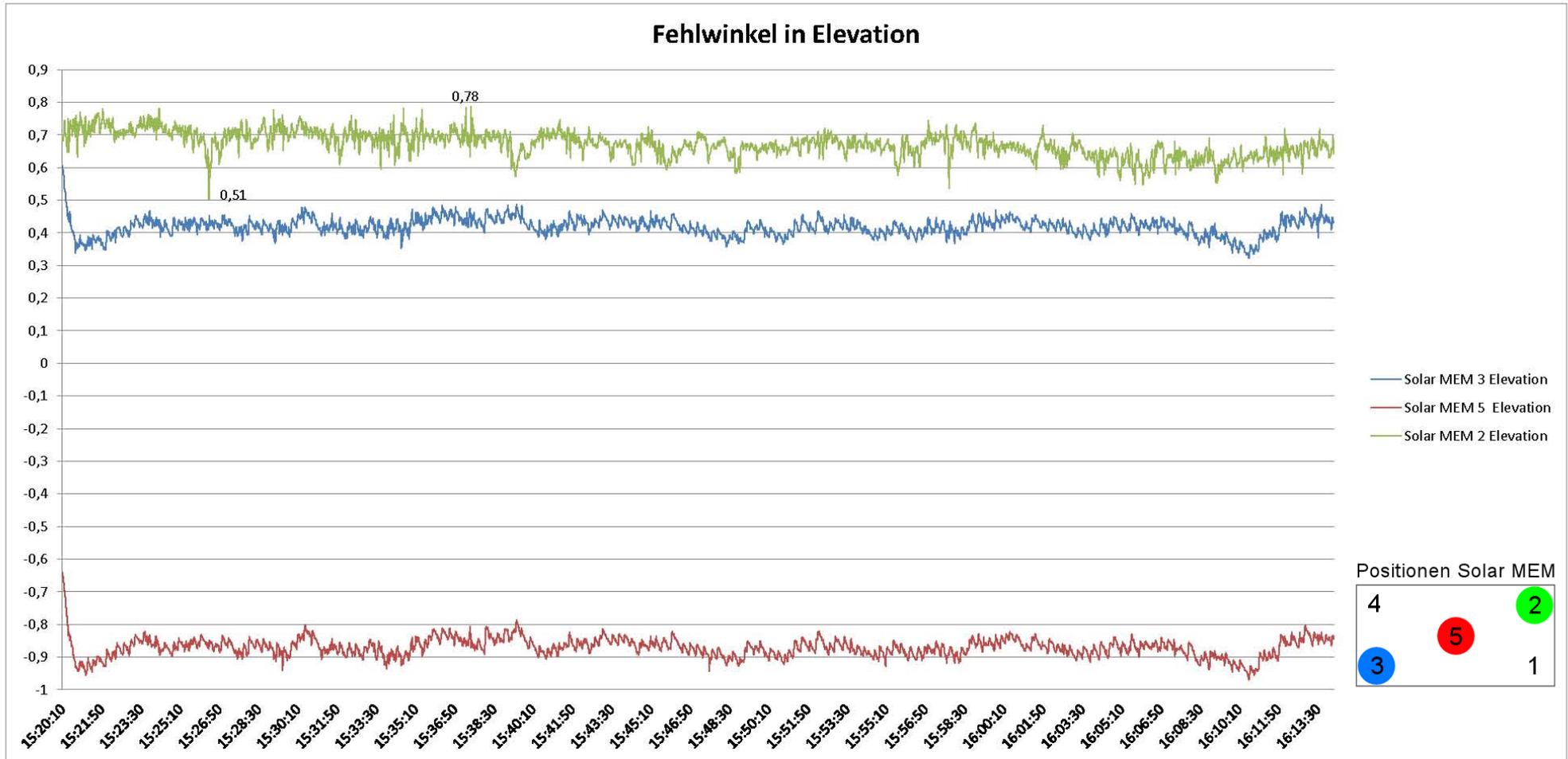


Fig. 66: Fehlwinkel in Elevation erfasst am 02.06.2015

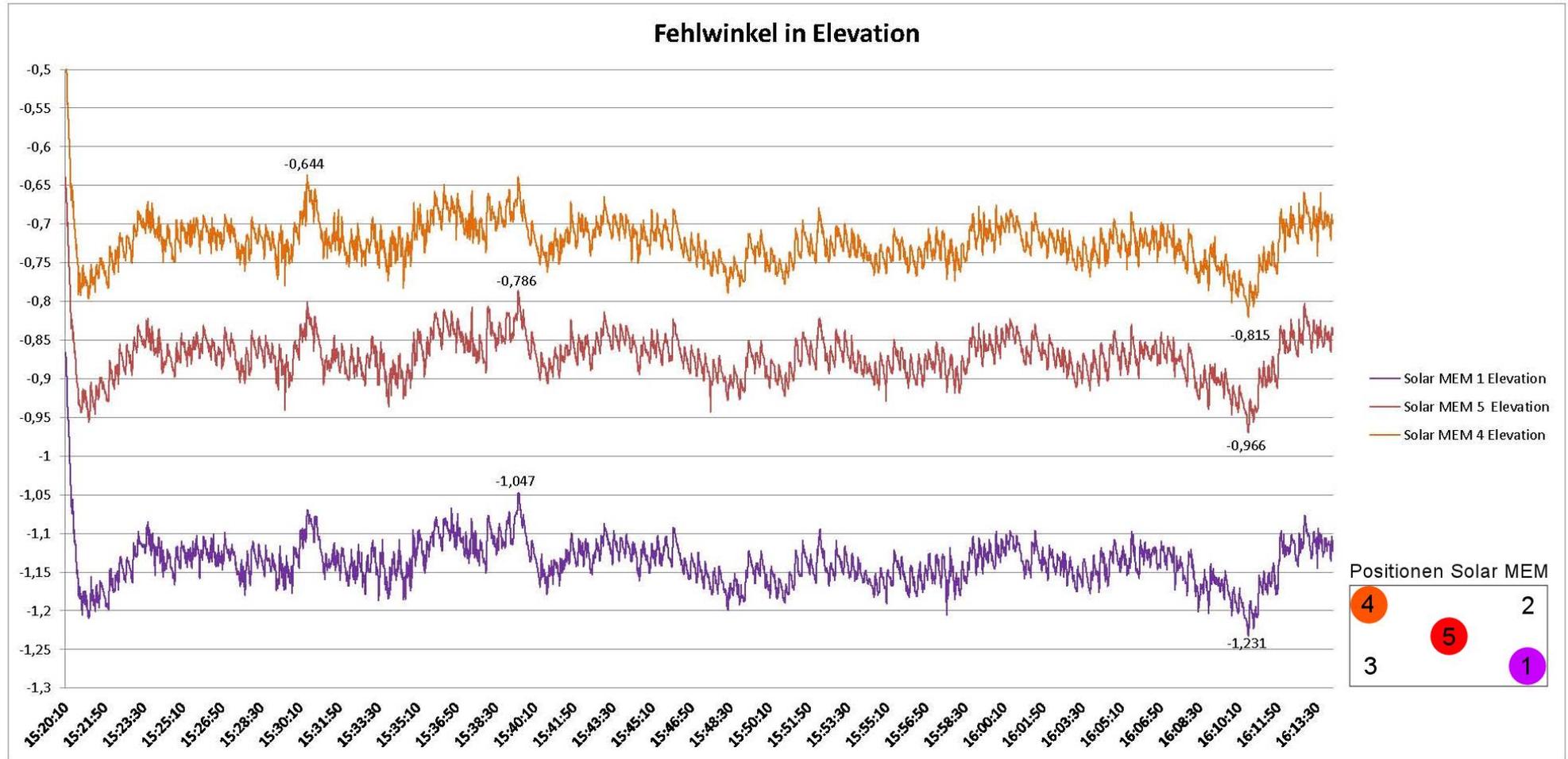


Fig. 67: Fehlwinkel in Elevation, erfasst am 02.06.2015

Durch die Fehlstellung der SolarMEMS aus Montage- und Ausrichtungsungenauigkeiten ergibt sich der in den Graphen zu sehende Offset, um den der eigentliche Fehlwinkel streut.

Wie man an den Graphen für die Fehlwinkel in Elevation und Azimut erkennen kann und auch die nachstehende Tabelle verdeutlicht, befinden sich sowohl die einzelnen Fehlwinkel als auch der Gesamtfehlwinkel  $\theta$  in dem Windintervall von ca. 2 m/s – 13 m/s stets innerhalb der vorgegebenen Spezifikation und damit der Nachführgenauigkeit des Trackers. Die Vorgaben an die Trackinggenauigkeit scheinen somit übererfüllt zu sein, so dass für die zukünftig geplanten Weiterentwicklungen zumindest aus Sicht der Nachführgenauigkeit Material und damit Kosten eingespart werden könnte.

		Fehlwinkel Solar MEMS														
		Solar MEM 1			Solar MEM 2			Solar MEM 3			Solar MEM 4			Solar MEM 5		
v [m/s]	gefordertes $\theta$	Azimut	Elevation	$\theta$	Azimut	Elevation	$\theta$	Azimut	Elevation	$\theta$	Azimut	Elevation	$\theta$	Azimut	Elevation	$\theta$
$2 \leq v \leq 13$	$\pm 0,24^\circ - \pm 0,43^\circ$	$\pm 0,15$	$\pm 0,1$	$\pm 0,18$	$\pm 0,08$	$\pm 0,14$	$\pm 0,16$	$\pm 0,15$	$\pm 0,08$	$\pm 0,17$	$\pm 0,13$	$\pm 0,1$	$\pm 0,16$	$\pm 0,14$	$\pm 0,08$	$\pm 0,16$

Farbcodierung wie in den Graphen

Fig. 68: Fehlwinkel Solar MEMS

Interessant in diesem Zusammenhang ist auch, dass es nicht zwingend die Spitzenwerte des Windes sind, die die höchsten Schwankungen in der Ausrichtung hervorrufen, sondern sich eine gute Korrelation zwischen den Gradienten entlang der Funktion Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit  $v(t)$ , also deren Beschleunigungswerte ergeben. Dieses erkennt man z.B. sehr gut an den Maximalwerten im Azimut zum Zeitpunkt 15:26, der nicht mit Spitzenwindgeschwindigkeiten korrespondiert, sondern mit dem Extremwert der zugehörigen Windbeschleunigung.

Mit Abschluss der Verifikation der Hybrid-Steuerung und des Tracking Algorithmus wurde Meilenstein 4.2 und auch 4.5, die allgemeine Verifikation des Trackers inklusive der Module, hinsichtlich eines Installationsortes in der nördlichen und südlichen Hemisphäre erfüllt. Weitere Auswertung hinsichtlich der Korrelationen zwischen Windrichtung und Bending werden zeigen, inwieweit es noch Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Tracker-Geometrie gibt. Ebenfalls steht noch die Verifikation für die Äquatornähe aus. Eine der Schwierigkeiten dort liegt in der an manchen Tagen auftretenden sehr hohen Bahngeschwindigkeit der Sonne. Die unten stehende Grafik Fig. 69 veranschaulicht die geschilderte Problematik: Während bis ca. 9:23 Uhr die in Azimut generierte Verfahrensgeschwindigkeit ausreicht um dem Sonnenverlauf zu folgen, nimmt die Bahngeschwindigkeit der Sonne danach sprunghaft zu und erreicht Werte von bis  $30^\circ/\text{min}$ . Dadurch kann der vorgegebene Sollwert in Azimut (Target Azimuth) in dieser Zeitspanne nicht mehr erreicht werden, was eine Ertragseinbuße zur Folge hätte, da der CPV-Generator in dieser Zeit nicht mehr korrekt zur Sonne ausgerichtet werden kann.

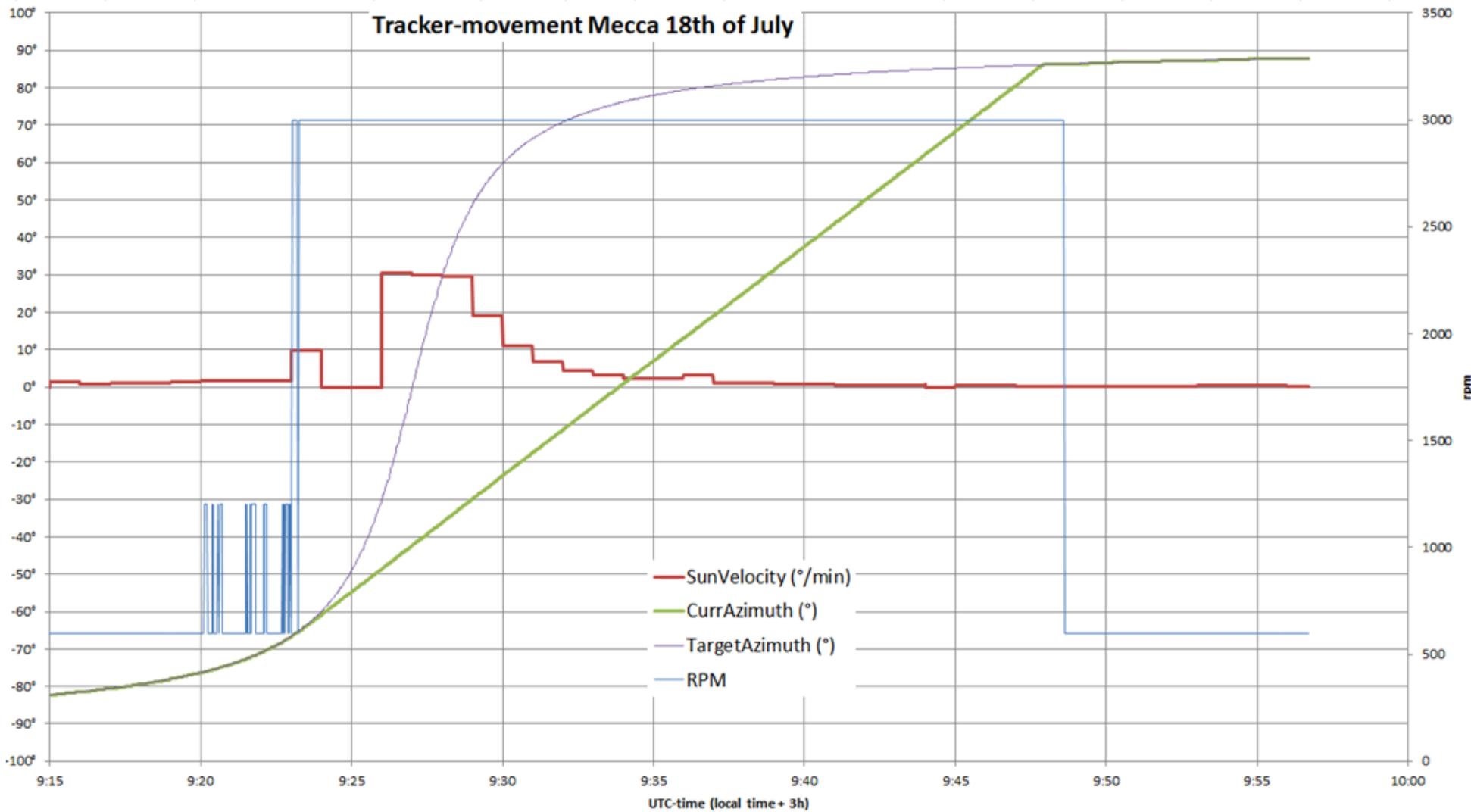


Fig. 69: Bahngeschwindigkeit der Sonne – Nachführungsgeschwindigkeit in Azimut, äquatornaher Standort

## 9 AP 4.7 und 4.8: Optimierung des Materialeinsatzes und Massenfertigungstauglichkeit

Zur Optimierung des Materialeinsatzes konnte durch die zu Anfangs durchgeführte Sensitivitätsanalyse nachgewiesen werden, dass eine Änderung des Akzeptanzwinkels und damit des maximalen Fehlwinkels von  $0,1^\circ$  auf  $0,2^\circ$  den Materialeinsatz an Stahl um ca. 10% senken kann. Folglich wurden die einzelnen Komponenten mithilfe einer FEM-Analyse dimensioniert und durch statische Berechnungen für beide Test-Systeme nachgewiesen. Eine noch größere Kostenreduktion durch die Wahl von  $0,3^\circ$  als Akzeptanzwinkel wurde von Soitec leider nicht als nicht ausreichend betrachtet, könnte aber für eine Zusammenarbeit mit für zukünftige CPV-Partner sehr interessant sein. Die nachstehende Grafik zeigt die das Ergebnis der durchgeführten Sensitivitätsanalyse die neben sämtliche möglichen reinen Kosten für den Tracker auch Baunebenkosten wie Fundamentierung mitberücksichtigt.

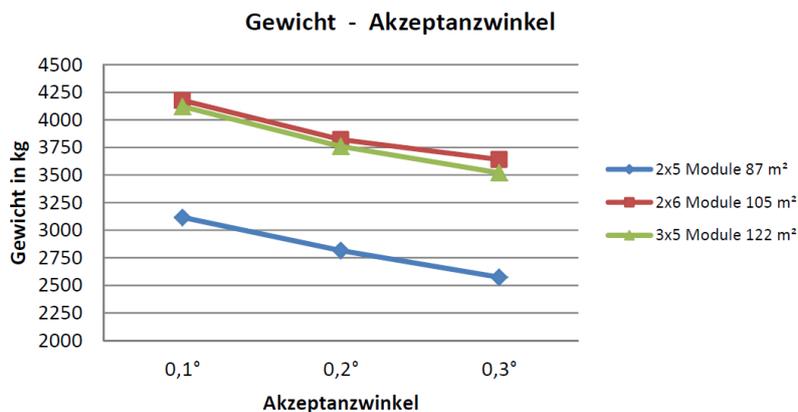


Fig. 70: Gewicht Stahlbau in Abhängigkeit des Akzeptanzwinkels

Der Einsatz z.B. einer Standard Motor-Getriebe Einheit in Verbindung mit Standardkomponenten und Halbzeugen hat die Kosten für den Tracker erheblich reduziert. Gerade was die Toleranzen in der Fertigung und deren Auswirkung auf das Bending, also das Durchbiegen unter Eigenlast, der Stahlkonstruktion angeht konnte gezeigt werden, dass man nicht auf spezielle -und damit teurere- Herstellverfahren zurückgreifen muss. Die Maßhaltigkeit der z.B. Halbzeuge und deren Bearbeitung, einschließlich der benötigten Überzüge sind von uns spezifiziert und werden an die Lieferanten weitergegeben werden. Ein sowohl bei den Lieferanten als auch bei uns etabliertes QM System sollte die Wirksamkeit einer gleichbleibend hohen Fertigungsqualität sichern, ohne die ein Tracker für einen CPV-Generator nicht eingesetzt werden könnte.

Weitere mögliche Kostenreduzierungen liegen eindeutig in der Ausführung der Tragarme und deren Anbindung an die Tragrohre. Dort kann durch die geplante Teilung der Tragarme in Adapter, die direkt auf die Tragrohre aufgeschweißt werden und den bauseits zu montierenden Tragarmen, der Montageaufwand erheblich reduziert werden. Gleichzeitig ist es wesentlich einfacher, günstigere Lieferanten zu finden, da jetzt auch hier auf Standardkomponenten und Bearbeitungsverfahren zurückgegriffen werden könnte.

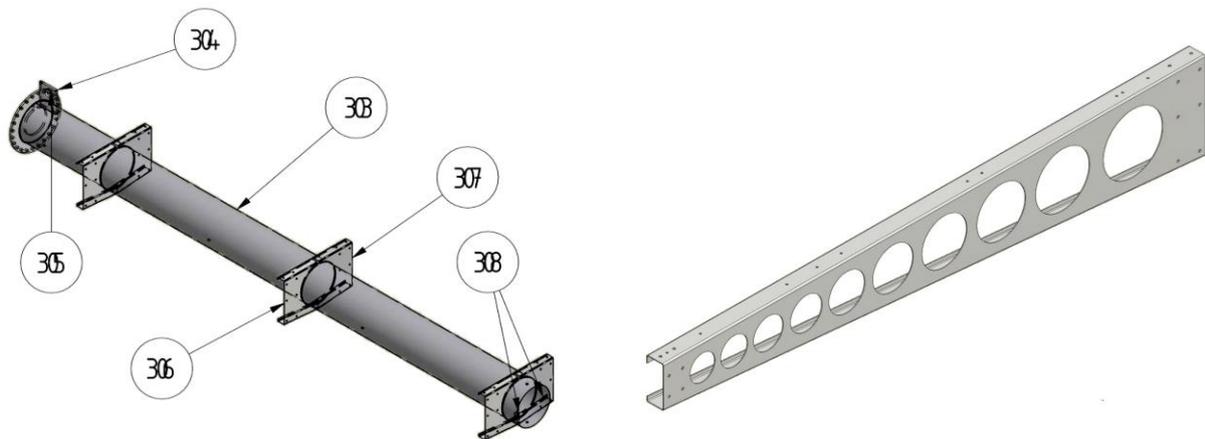


Fig. 71: Geteilte Tragarme mit aufgeschweißten Tragarmadapter und Tragarm

Ein gangbarer Weg, wäre statt die Tragarme direkt an die Tragrohre zu klemmen, schon während der Fertigung sogenannte Tragarmadapter an die entsprechenden Positionen aufzuschweißen und bauseits jeweils einzelne Tragarme anzuschrauben. Die Flexibilität wäre dann immer noch gegeben, nur kann dies nicht mehr bauseits entschieden werden, sondern muss in enger Zusammenarbeit mit dem Kunden genau festgelegt werden. Das hätte eine einfachere und schnellere Montage und auch Justage zur Folge. Mit einer Länge von kleiner als 3 m könnten dann auch günstigere Lieferanten gefunden werden, da es im Gegensatz dazu nur wenige Spezialfirmen gibt, die Längen über 3 m verarbeiten können.

Da die Produktion der Stahlbauteile, anders als bei Projektbeginn vorhergesehen, zukünftig extern vergeben werden, müssen die bei Projektantrag angedachte Qualitätskontrolle an die Lieferanten weitergegeben werden. Mit diesen sollten die Vorgaben diskutiert und die entsprechenden Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Fertigungsqualität festgelegt werden. Da diese Umsetzungen stets höchst individuell vom jeweiligen Lieferanten erfüllt werden, kann hier dazu noch keine Aussage getroffen werden. Deswegen gilt der Meilenstein 4.2 hier nur als teilerfüllt.

## 10 Fazit

Die Kirchner Solar Group konnte im Laufe des Projektes „CPV Magnus“ die Machbarkeit und Umsetzung eines CPV-Trackers aufzeigen und mit der Errichtung zweier Prototypen die Nachführgenauigkeit und Einhaltung des spezifizierten Akzeptanzwinkels für die nördliche und südliche Hemisphäre nachweisen. Ziel war es einen wirtschaftlich interessanten Tracker als Komplett-System mit Steuerung und Sicherheitssystem und bestehender Kommunikation-Infrastruktur anbieten zu können. Dies hat den Vorteil, dass keine langwierigen Einstellungen der Schnittstellen zwischen z.B. den Antriebskomponenten und einer kundeneigenen Ansteuerung notwendig sind. Die Antriebe, deren Motor-Getriebe Einheiten und die zugehörigen Endschalter sind aufeinander abgestimmt, so dass lediglich eine Anpassung hinsichtlich Modulmontage und –justage erfolgen müsste.

Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Tragarmmontage und-justage sind in Planung, um auch dort einen montagefreundlichen Prozess evaluieren zu können. Ein Umbau der Prototypen soll mit der neuen Tragarmvariante durchgeführt werden und wir versprechen uns dort neue Erkenntnisse um einen verbesserten workflow zu erzielen. Ein weiteres Augenmerk liegt noch auf der Ansteuerung und Verfahrensgeschwindigkeit des Nachführsystems für Installationsorte in Äquatornähe. Dort sind im Anschluss an dieses Projekt erste Adaptionen innerhalb der Steuerungssoftware vorgenommen worden und sollen in naher Zukunft möglichst unter realen Bedingungen, also an einem äquatornahen Standort getestet werden. Dafür ist geplant, eines der beiden Testsysteme dort zu installieren. So ist die Möglichkeit gegeben hier vor Ort den Tracker und dessen Verhalten in Äquatornähe zunächst grob zu testen und dann im zweiten Schritt diese Ergebnisse auf den unter Realbedingungen installierten zu übertragen.

Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Projektes steht ebenfalls noch die abschließende Zertifizierung des Trackers nach normativen Vorgaben aus. Diese würden anhand den Anforderungen neuer CPV-Partner durchgeführt werden und auch potenzielle Lieferanten würden je nach Zielmarkt qualifiziert werden.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN entfällt	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel CPV-Systeme mit hocheffizienter und installationsfreundlichen Modulen (CPV Magnus) – AP4Tracker-Design	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Gernhardt, Karin	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juli 2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Kirchner Solar Group GmbH Auf der Welle 8 36211 Alheim Heinebach	9. Ber. Nr. Durchführende Institution keine
	10. Förderkennzeichen 0325485C
	11. Seitenzahl 63
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben keine
	14. Tabellen sind in den Abbildungen enthalten
	15. Abbildungen 78
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) entfällt	
18. Kurzfassung	
<p><b>1. Derzeitiger Stand der Technik</b> Zu Beginn des Projektes wurde von der Kirchner Solar Group bereits zweiachsig nachgeführte Tracker für PV - Generatoren entwickelt und vertrieben. Für die Anwendung mit CPV-Modulen mussten, insbesondere was die Nachführgenauigkeit des Trackers nach der Sonne, die Steuerung und die Ausführung der Unterkonstruktion für die CPV-Module und deren Anbindung daran, neuartige Wege beschritten werden.</p> <p><b>2. Begründung/ Zielsetzung der Untersuchung</b> Durch Entwicklung eines neuen CPV Systems ist eine Reduktion des eingesetzten Materials möglich. Insbesondere durch den Verbund von System –und Komponentenlieferanten sowie Forschungspartnern wird eine globale Optimierung des Systems möglich, mit der die Kosten gesenkt und der Wirkungsgrad gesteigert werden kann. Weiterhin zielt dieses Projekt darauf ab, mittel- und langfristig die Energieversorgung mittels Photovoltaik kostengünstig zu ermöglichen und damit die CO<sub>2</sub>-Belastung zu reduzieren. Das Projekt wird ebenso die internationale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der konzentrierenden Photovoltaik erhöhen und durch die High-Tech Entwicklung bei den im Projekt involvierten Firmen den Standort Deutschland stärken bzw. die Exportchancen deutlich ausbauen. Die Untersuchungen zum Tracker-Design, als integraler Bestandteil des CPV-Systems, wurden von der Kirchner Solar Group GmbH durchgeführt.</p> <p><b>3. Methode</b> Untersuchungen zum möglichen Trackerdesign, des Nachführalgorithmus, den Prototypenbau und die Verifizierung der Daten aus dem Lasten-/ Pflichtenheft anhand der gewonnenen Messdaten.</p> <p><b>4. Ergebnis</b> Die Nachführgenauigkeit und Einhaltung des spezifizierten Akzeptanzwinkels der CPV –Module für die nördliche und südliche Hemisphäre konnte nachgewiesen werden und werden im Hinblick darauf sogar übererfüllt. Die Entwicklung, insbesondere in Bezug auf die Ansteuerung und Verfahrensgeschwindigkeit des Trackers, für die</p>	

Äquatornähe steht noch aus.

Für eine höhere Montagefreundlichkeit, sind noch konstruktive Verbesserungen geplant.

Die geplanten Zertifizierungen für die Zielmärkte stehen noch aus.

#### 5. Schlussfolgerung/ Anwendungsmöglichkeiten

Es konnte gezeigt werden, dass ein Tracker für CPV-Module entwickelt, konstruiert und errichtet werden konnte, der die entsprechenden Anforderungen aus der CPV-Technologie erfüllt. Dabei wurde auch, soweit möglich, z.B. auf am Markt verfügbare Standard-Komponenten zurückgegriffen um die Materialkosten so gering wie möglich zu halten.

Der Tracker lässt sich durch sein variables Design an die unterschiedliche Anforderungen anderer CPV-Modulen anpassen und kann somit sämtlichen in Frage kommenden Herstellern angeboten werden. Insbesondere können noch hinsichtlich des Akzeptanzwinkels der unterschiedlichen CPV-Module, immer unter Berücksichtigung der statischen Eigenschaften des Trackers, noch Material- und damit Kosteneinsparnisse generiert werden,

19. Schlagwörter

CPV-Module, Nachführung, Tracker,

20. Verlag  
entfällt

21. Preis  
entfällt