

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Science

Optimierung des Diffuslichtverhaltens einer Ost/West- Trackersteuerung am Beispiel der Photovoltaik- Freiflächenanlage in X (DK)

Bachelorarbeit
im Studiengang Umwelttechnik



vorgelegt von:

Lukas Tamschick



abgegeben am:

07.09.2022

Erstgutachter:

Prof. Dr. Timon Kampschulte (HAW Hamburg)

Zweitgutachter:

Julius Biesterfeldt (CEE Operations GmbH)

Vorwort

Die vorliegende Abschlussarbeit des Bachelorstudiengangs Umwelttechnik der HAW Hamburg mit dem gewählten Schwerpunkt „Erneuerbare Energien“ wurde von der CEE Operations GmbH, nachfolgend CEE Operations genannt, unterstützt.

Die CEE Group ist Teil der Brookfield Asset Management Gruppe, die in 30 Ländern vertreten ist und zu den weltweit führenden Asset-Managern zählt. Am Standort Hamburg werden Solar- und Windparks in Deutschland, Frankreich, den Niederlanden, Schweden und Dänemark verwaltet mit insgesamt rund 1,3 GW installierter Leistung. Die CEE Operations ist unter anderem für die Technische Betriebsführung im Bereich Photovoltaik in der CEE Group verantwortlich und stellt den Betrieb von 14 Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Deutschland und den Niederlanden sicher.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Photovoltaik-Freiflächenanlage X gehört der CEE Group, wird allerdings von einem externen Technischen Betriebsführer verwaltet. Die CEE Operations unterstützt diese Arbeit, um ihre Kenntnisse über Photovoltaik-Trackingsysteme zu erweitern. Außerdem wird eine mögliche Verbesserung der Trackersteuerung in Abhängigkeit der Ergebnisse dieser Arbeit besprochen werden.

Mein Dank gilt meinen beiden Gutachtern Prof. Dr. Timon Kampschulte von der HAW Hamburg und Julius Biesterfeldt von der CEE Operations für die umfassende und schnelle Beantwortung fachlicher Fragen.

Außerdem möchte ich den zahlreichen Korrekturleserinnen und -lesern dieser Arbeit danken. Vielen Dank an Tom Kruse für die Unterstützung bei der mathematischen Realisierung der astronomischen Steuerung. Vielen Dank an alle Beteiligten bei der Verwirklichung des Praxistests in X.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	A
Symbolverzeichnis	B
Abbildungsverzeichnis	D
1 Einführung	1
2 Grundlagen	3
2.1 PV-Freiflächenanlagen: Aufbau und Überwachung	3
2.2 Tracking: Funktionsweise und Mehrertrag	5
2.2.1 Grundprinzip und Wirkung	5
2.2.2 Einflussgrößen	8
2.2.3 Trackersteuerungen	10
2.3 Realisierung einer astronomischen Ost/West-Trackersteuerung	11
2.4 Vorstellung der Photovoltaik-Freiflächenanlage X	15
3 Hard- und Software für die Analyse	16
3.1 Eigenbau Sensorstation RAGMAR	16
3.1.1 Aufbau und Anwendung	16
3.1.2 Messunsicherheit Zeit	18
3.1.3 Messunsicherheit Neigungswinkel	19
3.1.4 Messunsicherheit Beleuchtungsstärke und Kalibrierung	22
3.2 Monitoringportal Y	24
3.3 Simulationsprogramm Sonnenstand SPA	25
4 Entwicklung einer optimierten Trackersteuerung	26
4.1 Analyse des Trackerverhaltens der PVF X in Y	26

4.2 Die Position des optimalen Diffuslichtertrags	29
4.3 Optimierter Steuerungsalgorithmus vct	33
5 Auswertungen des Praxistests in X	37
5.1 Tagesauswertung der Messergebnisse RAGMAR's.....	37
5.2 Abschätzung des möglichen Jahresmehrertrags	44
5.3 Abschätzung der möglichen Tracker-Energieeinsparungen.....	48
5.4 Diskussion der Ergebnisse	52
6 Zusammenfassung und Ausblick	54
Literaturverzeichnis.....	57
Anhang	I
Eidesstattliche Erklärung und Veröffentlichungserklärung	XXVI

Abkürzungsverzeichnis

AD-Wandlung	=	Analog-Digital-Wandlung
ADC	=	Analog-Digital-Converter = Analog-Digital-Wandler
ASTS	=	aktives, solares Trackingsystem
GmbH	=	Gesellschaft mit begrenzter Haftung
LDR	=	Light Dependent Resistor = Photowiderstand
LED	=	Leuchtdiode
LMN	=	Lichtsensormess Nord = Umgebungslichtsensormess RAGMAR
LMS	=	Lichtsensormess Süd = Umgebungslichtsensormess RAGMAR
LO	=	Lichtsensormess Ost = Umgebungslichtsensormess RAGMAR
LSD	=	Least significant Digits = Letzte signifikante Stelle des Messergebnis
LW	=	Lichtsensormess West = Umgebungslichtsensormess RAGMAR
N	=	Norden
O	=	Osten
PC	=	Personal Computer
PV	=	Photovoltaik
PVF	=	Photovoltaik-Freiflächenanlage
S	=	Süden
SD-Karte	=	Secure Digital Memory Card = sichere digitale Speicherkarte
SPA	=	Solar Position Algorithm = Name des Sonnenpositionsalgorithmus
TBF	=	Technische Betriebsführung
Trafo	=	Transformator
vct	=	if_visible_control_tracking() = Name optimierter Steuerungsalgorithmus
W	=	Westen

Symbolverzeichnis

A	=	Fläche
A_{gen}	=	geneigte Fläche
A_s	=	orthogonal zur Sonne ausgerichtete Fläche
α_E	=	Azimut PV-Modul
α_s	=	Azimut der Sonne
$\alpha_{s,neu}$	=	umgerechneter Azimut der Sonne = $360^\circ - \alpha_s$
δ	=	Sonnendeklination (Anhang)
ϕ	=	Neigungswinkel des Trackers von der Horizontalen aus gemessen
E	=	Bestrahlungsstärke
\bar{E}	=	stündlicher Mittelwert der Bestrahlungsstärke
f	=	Frequenz (Anhang)
Δf	=	Abweichung der Frequenz (Anhang)
f_{out}	=	Output-Frequenz Kristall (Anhang)
γ_E	=	Höhenwinkel PV-Modul
γ_s	=	Elevation der Sonne
$\gamma_{s,neu}$	=	umgerechnete Elevation der Sonne = $90^\circ - \gamma_s$
\bar{H}	=	stündlicher Mittelwert der Bestrahlung
J'	=	Parameter zur Sonnenstandsberechnung (Anhang)
k	=	Höhenvariation des Trackers
λ	=	geografische Länge (Anhang)
LZ	=	Lokale Zeit (Anhang)
MEZ	=	Mitteleuropäische Winterzeit
MOZ	=	Mittlere Ortszeit (Anhang)
Φ	=	Strahlungsleistung
φ	=	geografische Breite (Anhang)
$P_{Tracker}$	=	Trackerposition (Anhang)
PR	=	Performance Ratio = Systemwirkungsgrad (der PVF)
θ_{gen}	=	Einfallswinkel der Sonnenstrahlen beziehungsweise Winkel zwischen A_s und A_{gen}
\vec{S}	=	3-D Vektor der Sonnenposition mit S_1, S_2, S_3
SP_{Sensor}	=	durch einen Sensor ermittelte Sonnenposition (Anhang)
SP_{SPA}	=	aktuelle Sonnenposition (Anhang)

STE = Trackingfehler (Anhang)
T = Periodendauer
UTC = Coordinated Universal Time = Koordinierte Weltzeit
WOZ = wahre Ortszeit (Anhang)
Zgl = Zeitgleichung zur Sonnenstandsrechnung (Anhang)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematischer Aufbau einer PVF.....	4
Abbildung 2 Proportionalitätsbeweis Bestrahlungsstärke und Ertrag.....	4
Abbildung 3 Bestrahlungsstärke bei verschiedenen Neigungswinkeln.....	5
Abbildung 4 Bekannte Größen der Photovoltaik zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Neigungswinkel.....	6
Abbildung 5 Prinzip des Ost/West-Trackings.....	6
Abbildung 6 Bestrahlungsstärke der PVF X am 09.05.2022 im Tagesverlauf.....	7
Abbildung 7 Neigungswinkel des Trackers 876 der PVF X am 09.05.2022.....	8
Abbildung 8 Isotroper Ansatz Diffusstrahlung.....	9
Abbildung 9 Sonnenbahndiagramm für den Standort Berlin.....	12
Abbildung 10 Prinzip der Ost/West-Trackersteuerung.....	13
Abbildung 11 Grafik zur Wandlung der kartesischen Koordinaten in Kugelkoordinaten.....	14
Abbildung 12 Luftbildaufnahme der PVF X.....	15
Abbildung 13 Zuordnung der Wechselrichter mit festen und trackenden Modulen zu den Trafostationen der PVF X.....	15
Abbildung 14 Ost/west-trackende und programmierbare Sensorstation RAGMAR.....	17
Abbildung 15 Kalibrierung des Neigungssensors.....	19
Abbildung 16 Kalibrierung des Accelerometers.....	20
Abbildung 17 Eingegebene Daten in den SPA Calculator.....	26
Abbildung 18 Neigungswinkel des Trackers 429 der PVF X in Abhängigkeit vom Datum.....	28
Abbildung 19 Energiemanagement des Trackers 429.....	29
Abbildung 20 Ermittlung der näherungsweise optimalen Diffuslichtposition im Tagesverlauf.....	31
Abbildung 21 Grenzwertermittlung, ab dem sich Tracking lohnt.....	33
Abbildung 22 Vergleich der astronomischen Steuerung der PVF X mit RAGMAR's vct-Steuerung.....	35
Abbildung 23 Darstellung der vct-Steuerung als Programmablaufplan.....	36

Abbildung 24 01.06.2022 X Vergleich der Messwerte RAGMAR's mit denen der PVF X.....	39
Abbildung 25 Tagesauswertung der Energieeinsparung und Bestahlungsmehrerträge RAGMAR's vom 02.06.2022.....	42
Abbildung 26 02.06.2022 Mehrertrag RAGMAR im Vergleich zur PVF X in % im Vergleichszeitraum.....	43
Abbildung 27 Prozentualer und absoluter Mehrertrag RAGMAR im Vergleich zur PVF X.....	45
Abbildung 28 Interpolation der bestahlungsabhängigen Mehrerträge RAGMAR's im Vergleich zur PVF X zur Jahreshochrechnung.	46
Abbildung 29 Prozentuale Tracker-Energieeinsparung RAGMAR im Vergleich zur PVF X.	49
Abbildung 30 Interpolation prozentualer Tracker-Energieeinsparung RAGMAR's im Vergleich zur PVF X zur Jahreshochrechnung.	50
Abbildung 31 Abgeschätzter Ladezustand Trackerakkus bei angewendeter Steuerungsoptimierung im Winter 2021.....	52

1 Einführung

Weltweit werden fossile Rohstoffe verbraucht, Verteuerungen sind erkennbar und die Verbrennung fossiler Rohstoffe ist Verursacher des Klimawandels (Mertens 2022: 19). Um eine nachhaltige Energieerzeugung sicherzustellen, wird Photovoltaik (PV) „eine wesentliche Säule des zukünftigen Energiesystems“ (Mertens 2022: 19) darstellen.

Die weltweite Energieerzeugung durch Photovoltaik hat sich vom Jahr 2000 bis 2020 mehr als vertausendfacht: Im Jahr 2000 betrug die installierte Leistung rund 700 MWp, im Jahr 2020 rund 760 GWp mit einem Rekordzubau von 175 GWp von 2020 bis 2021 (International Energy Agency 2022: 9). Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend auch zukünftig fortsetzen wird (Mertens 2022: 40).

Bei einer derartig großen Bedeutung für die weltweit nachhaltige Entwicklung der Energieerzeugung, ist es auch wichtig, die Effizienz von PV-Anlagen zu optimieren: Je effizienter eine PV-Anlage ist, desto größer ist ihr energetischer und wirtschaftlicher Ertrag. Zur Effizienzsteigerung können nicht nur neue Technologien wie neue PV-Module entwickelt (vgl. Hezel/Glunz 2003: 38), sondern auch Bestandsanlagen verbessert werden (vgl. Steffens 2018).

Eine Möglichkeit der Effizienzoptimierung bieten Trackingsysteme, bei denen die PV-Module der Sonne nachgeführt werden¹ (Zulkaflı et al. 2018: 91).

Dies kann zum Beispiel in Form einer aktiv einachsıg nachgeführten Ost/West-Trackinganlage mit astronomischer Steuerung verwirklicht werden. „Aktiv“ bedeutet, dass ein durch Hilfsenergie betriebener Motor als Antrieb verwendet wird (Sumathi et al. 2017: 130). Die Ost/West-Ausrichtung beschreibt in dieser Arbeit die Ausrichtungen der Moduloberfläche. Eine horizontale Achse verläuft in Nord/Südrichtung, woran ein Gestell mit den PV-Modulen befestigt ist² (vgl. Anhang 9). Die Moduloberfläche zeigt morgens nach Osten und dreht sich im Verlauf des Tages nach Westen (Neville 1978: 7). Die astronomische Steuerung beschreibt die optimale Orientierung des Trackers zur Sonne bei ausschließlich direkter Strahlung, die durch einen Algorithmus errechnet wird (Mousazadeh et al. 2009: 1811). Der Tracker neigt sich zu diesen theoretisch errechneten Positionen in Abhängigkeit von Datum und Uhrzeit (Rodríguez-Gallegos et al. 2020: 1474).

Dieses Trackingsystem ist auch auf der Photovoltaik-Freiflächenanlage (PVF) X im Norden Dänemarks installiert, deren Steuerung in dieser Arbeit untersucht wird. Die Tracker sind als Stand-Alone-System umgesetzt, das heißt ohne Netzanschluss.

Ost/West-Trackinganlagen und verschiedene Trackersteuerungen wurden bereits ausführlich in der Literatur untersucht. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Systeme und Einflussfaktoren ist in Kapitel 2.2 zu finden.

¹ Auch der Wechselrichter hat Maximum Power Point Tracker zur Ertragsoptimierung installiert, sodass man in diesem Bereich ebenfalls von Tracking spricht (Mertens 2022: 219). In dieser Arbeit umfasst der Begriff „Tracking“ ausschließlich Sonnenstandsnachführungen.

² In der Literatur wird teilweise auch die Achsenausrichtung als Systemname verwendet: Auch wenn die Rede von einem Ost-West orientierten Modul ist, kann gemeint sein, dass die Oberfläche nach Süden und Norden zeigt (Chang 2009: 1531). In dieser Arbeit wird deswegen nicht der Name der Achsenausrichtung angegeben, da sich dies mit der Bezeichnung der Ausrichtung fixer Systeme widerspricht (Mertens 2022: 59; 283).

Einflussfaktoren auf den Ertrag einer Ost/West-Trackinganlage sind der Standort, die Jahres- und Tageszeit und die Wetterverhältnisse (Chaidoulis/Karanikolas 2020: 82), wobei eine Abhängigkeit der Faktoren untereinander besteht. Eine optimale Trackersteuerung versucht, diese Einflussfaktoren möglichst genau zu berücksichtigen, um den größtmöglichen Ertrag zu erzielen.

Eine mit der PVF X vergleichbare Freiflächenanlage befindet sich in Tuscania, Italien (vgl. Dolara et al. 2012). Diese ist mit dem gleichen Trackingsystem und der gleichen Trackersteuerung wie die PVF X ausgestattet und wurde bereits in der Literatur analysiert (vgl. Dolara et al. 2012). Verglichen mit der horizontalen Ebene, erzielte das Trackingsystem in den Jahren 2009 und 2010 einen Jahresmehrertrag von 29 % (Dolara et al. 2012: 527) beziehungsweise einen Mehrertrag von 17 % im Vergleich zu einer optimal südausgerichteten Fläche von 30 ° Neigung (Dolara et al. 2012: 528). Dabei variiert der Mehrertrag monatlich: 35 % Mehrertrag wurden im Oktober im Vergleich zur horizontalen Ebene erzielt, 22 % im Mai (Dolara et al. 2012: 528). Die astronomische Steuerung arbeitet dabei unabhängig von den Wolkenverhältnissen (vgl. Dolara et al. 2012: 527).

Tracking kann jedoch kontraproduktiv sein, wenn mehr als 90 % der einfallenden Strahlung diffus ist (Quesada et al. 2015: 148). Die horizontale Ausrichtung kann bei starker Bewölkung im Tagesdurchschnitt bis zu 50 % Mehrertrag im Vergleich zu einer astronomischen Nachführung erbringen (Kelly/Gibson 2009: 2100). Zur Unterscheidung der direkten und diffusen Strahlung, können Lichtsensoren wie Pyranometer verwendet werden, um den Tracker in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärken- und Wolkenverhältnisse optimal ausrichten zu können (Kelly/Gibson 2009: 2101).

Steuerungstechnisch kann dies zum Beispiel in Form eines Bestrahlungsstärkengrenzwertes umgesetzt werden (Rubio et al. 2007: 2178). Wird der Grenzwert unterschritten, kann sich der Tracker entweder in Richtung 0 ° ausrichten (Kelly/Gibson 2009: 2101), um einen optimalen Ertrag zu erzielen oder an der Trackerposition der Grenzwertunterschreitung verXn (Rubio et al. 2007: 2178; 2179), um dadurch Trackingenergie einzusparen. Der Grenzwert ist dabei abhängig von den Einflussfaktoren Standort und Jahres- und Tageszeit (Quesada et al. 2015: 151).

Ein anderes Steuerungssystem, das vor allem in Kombination mit der astronomischen Steuerungsmethode ein besseres Diffuslichtverhalten aufweisen könnte (Roth et al. 2003: 393), ist die Sensorsteuerung (AL-Rousan et al. 2018: 2555), bei der sich die Tracker mit Hilfe von Sensoren nach der Stelle der aktuell größten, gemessenen Strahlung ausrichten (vgl. Malav/Vadhera 2015).

Weitere Steuerungsmöglichkeiten bedienen sich der künstlichen Intelligenz, um beispielsweise anhand eines Wolkenvorhersagemodells im Voraus die optimale Trackingposition errechnen zu können (AL-Rousan et al. 2018: 2559).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Steuerung des bisherigen Trackingsystems der PVF X zu analysieren und bezüglich des Diffuslichtverhaltens so zu verbessern, dass mehr Energie durch eine optimierte Modulausrichtung produziert werden kann.

Im Winter 2021 hat eine Unterdimensionierung der Versorgungsspannung der Tracker dazu geführt, dass aufgrund von Tiefenentladung der Akkus ein Großteil der Tracker defekt waren. Daher ist das vorrangige Ziel dieser Arbeit, durch eine optimierte Steuerung den Energieverbrauch der Tracker zu senken und damit eine erneute Tiefenentladung zu verhindern.

Nach Erklärung der Grundlagen über PVF, einer Einführung ins Tracking und der Detailbeschreibung bisheriger Trackingsysteme, folgt die Vorstellung der PVF X. Für die Untersuchungen werden Daten des Anlagenüberwachungssystems und einer selbst gebauten Sensorstation verwendet. Nach Analyse

des bisherigen Systems wird ein verbesserter Steuerungsalgorithmus bei Diffusstrahlung entwickelt und mit Hilfe der Sensorstation in X getestet. Die Ergebnisse bezüglich Tracking-Energieeinsparung und Mehrertrag werden analysiert und auf ein Jahr prognostiziert. Alle Ergebnisse werden zusammengefasst, der Fehler der Analyse eingeschätzt und mit dem aktuellen Forschungsstand verglichen. In Form eines Ausblicks werden mögliche Folgeschritte für die Praxisumsetzung beschrieben.

2 Grundlagen

2.1 PV-Freiflächenanlagen: Aufbau und Überwachung

Im privaten Bereich wird überwiegend Photovoltaik auf Dächern installiert. Es besteht auch die Möglichkeit, PV-Module auf freien Flächen wie Äckern zu installieren. Diese PV-Anlagen werden Photovoltaik-Freiflächenanlagen genannt.

Dabei kann die installierte Leistung einer PVF stark variieren: Kleinere Anlagen weisen Nennleistungen < 50 kWp auf, wohingegen die Nennleistungen größerer Anlagen > 10 MWp betragen (Koscher 2021: 53).

Der grundlegende Aufbau einer PVF ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die Komponentenanzahl und Verschaltungsart kann jedoch stark abweichen, weshalb Abweichungen im Folgenden mit „i. d. R.“ (für „in der Regel“) gekennzeichnet sind:

Die PV-Module sind auf Modultischen installiert (vgl. blauer Hintergrund von Abbildung 1), die i. d. R. fest mit in Deutschland optimaler 35° Neigung nach Süden ausgerichtet sein können (Mertens 2022: 386 f.). Um ein Optimum zwischen Neigungswinkel und Modulertrag zu erzielen, kann der Neigungswinkel weiter verringert werden, wodurch sich eine Verschattung der Modulreihen bei tief stehender Sonne und gleichem Modulreihenabstand verringert (Konrad 2008: 55.f). Abhängig von Modul- und Wechselrichtertypen können zum Beispiel 20 Module in Reihe zu einem String verschaltet sein (vgl. grüne Punkte von Abbildung 1). Je nach Wechselrichtertyp können auch mehrere Strings parallel verschaltet sein (vgl. blaue Punkte von Abbildung 1). Dies wäre bei Zentralwechselrichtern der Fall. Bei Strangwechselrichtern gibt es i. d. R. keine Parallelschaltung der Strings (Cramer 2005: 35).

Mehrere Strings (vgl. orangene Punkte von Abbildung 1) werden i. d. R. auf einen Wechselrichter geführt, der aus Gleichspannung Wechselspannung erzeugt (vgl. grüner Hintergrund von Abbildung 1).

Die Wechselspannung mehrerer Wechselrichter (vgl. rote Punkte von Abbildung 1) wird auf einen Transformator (Trafo) geleitet (vgl. orangener Hintergrund von Abbildung 1). Dieser transformiert die Niederspannung der Wechselrichter i. d. R. auf das Mittelspannungsniveau von zum Beispiel 20 kV. In größeren PVFs können auch mehrere Trafos vorhanden sein (vgl. gelbe Punkte von Abbildung 1).

In der Übergabestation (vgl. grauer Hintergrund von Abbildung 1) befindet sich der Netzverknüpfungspunkt mit der Mittelspannung von zum Beispiel 20 kV (Wang 2015: 4). Ein Zähler misst die vergütete, elektrische Energieproduktion der PVF.

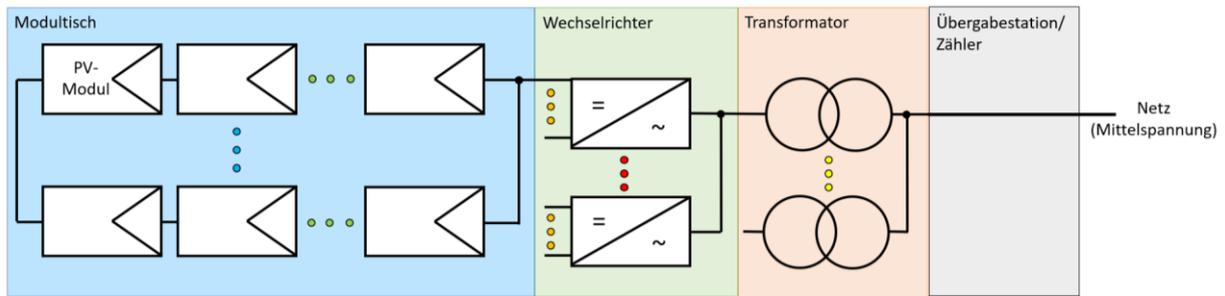


Abbildung 1 Schematischer Aufbau einer PVF. Die 3 Punkte verschiedener Farben geben an, dass mehrere der abgebildeten Komponenten vorkommen können. Zum Beispiel geben die orangenen Punkte an, dass mehrere Strings an einen Wechselrichter angeschlossen werden können. Die Informationen basieren auf der internen Anlagendokumentation der 14 verwalteten PVF der Technischen Betriebsführung der CEE Operations (eigene Abbildung).

Durch Fernüberwachung der Anlagen in sogenannten Monitoringportalen kann die Funktionalität der Anlagen einfach und schnell überprüft werden. Datenübertragungen zum Portal können in Form von Strom- und Spannungsmessungen für die verschiedenen Komponenten erfolgen, die in Abbildung 1 mit einem farbigen Hintergrund ümarkiert sind: Unter anderem gibt es die Stringüberwachung, Wechselrichterüberwachung, Transformatorüberwachung und die Überwachung des Einspeisezählers.

Außerdem kann eine externe Sensorstation installiert sein, deren gemessene Bestrahlungsstärke proportional zum Anlagenertrag ist. Dieser wird durch den Einspeisezähler gemessen (vgl. Abbildung 2).

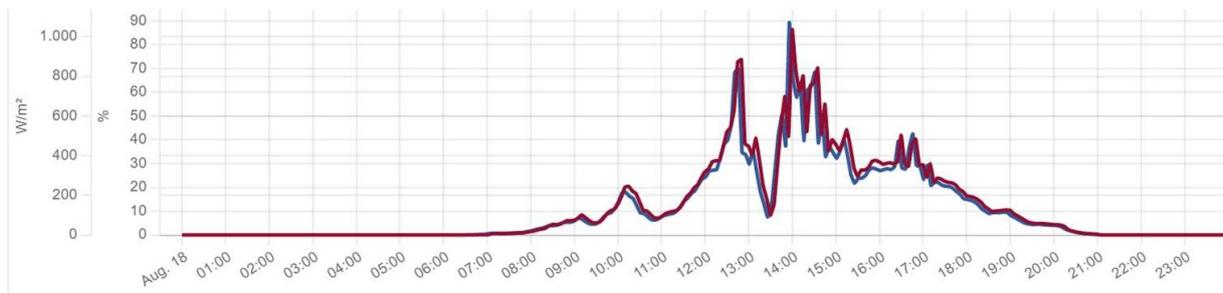


Abbildung 2 Proportionalitätsbeweis Bestrahlungsstärke und Ertrag. Die Bestrahlungsstärke in $\frac{W}{m^2}$ (dunkelblau), gemessen durch ein Pyranometer in Modulebene (30° Neigung, Südausrichtung) und die prozentuale Wirkleistung einer PVF der CEE Operations (dunkelrot) sind in Abhängigkeit von der Uhrzeit am 07.06.2022 dargestellt. Die Proportionalität des Anlagenertrags zur Bestrahlungsstärke ist erkennbar. Abweichungen entstehen beispielsweise dadurch, dass das Pyranometer nur an einem punktuellen Ort misst, wohingegen die PV-Module die Strahlung, die auf alle Module trifft, in elektrische Energie umwandeln. Zur Visualisierung eines Proportionalitätsfaktors zwischen Bestrahlung und elektrischem Ertrag kann auch Anhang 33 betrachtet werden. Das Bild ist ein Screenshot aus dem firmeninternen Monitoringportal der CEE Operations.

2.2 Tracking: Funktionsweise und Mehrertrag

2.2.1 Grundprinzip und Wirkung

Abbildung 3 zeigt die Beziehung zwischen der Strahlungsleistung Φ und dem Einfallswinkel θ_{gen} der orthogonal zur Sonne ausgerichteten Fläche A_s gegen die geneigte Fläche A_{gen} bei Direktstrahlung.

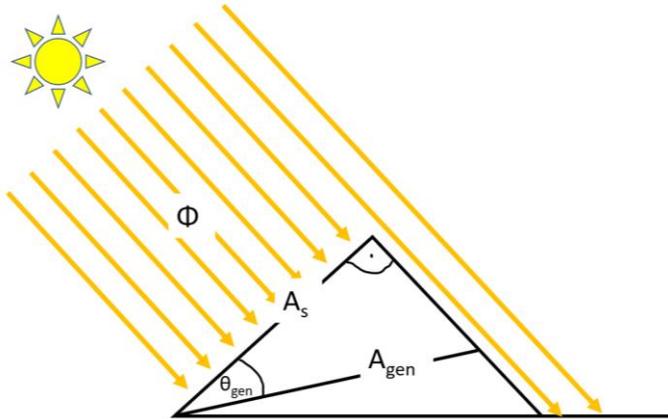


Abbildung 3 Bestrahlungsstärke bei verschiedenen Neigungswinkeln. Die Strahlungsleistung ist durch die Sonnenstrahlen in Form von gelben Pfeilen symbolisiert (eigene Abbildung).

Die Sonne strahlt eine konstante Strahlungsleistung in Watt aus. Die Strahlungsleistung ist das Produkt aus Bestrahlungsstärke E in $\frac{W}{m^2}$ und der bestrahlten Fläche A in m^2 :

$$\Phi = E \cdot A \quad (\text{Quaschnig 2019: 86}) \quad (1)$$

Da die gleiche Strahlungsleistung auf die Flächen A_s und A_{gen} fällt, ergibt sich:

$$\Phi = E_s \cdot A_s = E_{gen} \cdot A_{gen} \quad (2)$$

Geometrisch folgt aus Abbildung 3:

$$A_s = \cos(\theta_{gen}) \cdot A_{gen} \quad (3)$$

Nach Einsetzen von Formel (3) in (2) und Umstellen erhält man:

$$E_s = \frac{E_{gen}}{\cos(\theta_{gen})} \quad (4)$$

Da $\cos(\theta_{gen}) \leq 1$ ist, ist die Bestrahlungsstärke einer geneigten Fläche in Abhängigkeit des Einfallswinkels um den Faktor $\cos(\theta_{gen})$ kleiner als die Bestrahlungsstärke einer orthogonal zur Sonne ausgerichteten Fläche.

Somit gilt: Je geringer der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf ein PV-Modul ist, desto größer ist die gemessene Bestrahlungsstärke. Da der Ertrag einer PV-Anlage proportional zur Bestrahlungsstärke ist, vergrößert sich der energetische Ertrag des Moduls entsprechend (vgl. Abbildung 2).

Durch Tracking wird der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf die PV-Module fortlaufend verändert, sodass dieser über einen größeren Zeitraum geringer ist als bei einer fixen Installation. Folglich wird dadurch ein Mehrertrag erwirtschaftet. Im dreidimensionalen Raum besteht noch ein weiterer Freiheitsgrad. Die in der Photovoltaik verwendeten Größen sind in Abbildung 4 dargestellt:

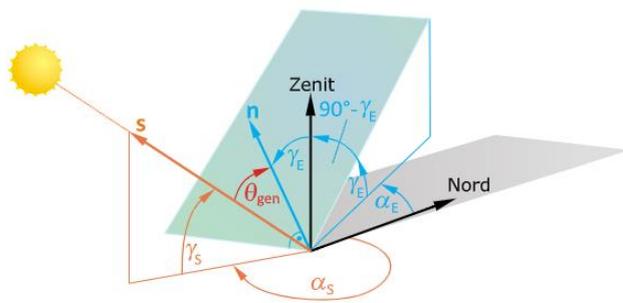


Abbildung 4 Bekannte Größen der Photovoltaik zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Neigungswinkel. Die Sonnenposition wird durch den Sonnenhöhenwinkel, Elevation γ_s genannt, und den Sonnenazimut, α_s genannt, beschrieben. Der Sonnenazimut kann mit der Kompassausrichtung der Sonne gleichgesetzt werden. Das PV-Modul ist als blaue Fläche dargestellt, die ebenfalls um den Azimut α_E und den Höhenwinkel γ_E verstellbar ist. Der bereits erwähnte Einfallswinkel θ_{gen} beschreibt den Winkel, den das Modul von der orthogonalen Einfallswinkel der Sonne verstellbar ist (Quaschnig 2019: 85).

Durch zweiachsiges Tracking werden die PV-Module über einen großen Zeitraum orthogonal zur Sonne ausgerichtet. Ein Beispiel dazu ist in Anhang 1 dargestellt. Zweiachsiges Tracking wird in der kommerziellen Anwendung selten genutzt, weil der technische und elektrische Aufwand größer ist (Mertens 2022: 60).

Eine Möglichkeit des Trackings mit einachsiger Nachführung, ist das Ost/West-Tracking (vgl. Dolara et al. 2012). In Abbildung 5 ist das Prinzip einer aktiv einachsigen nachgeführten Ost/West-Trackinganlage dargestellt.

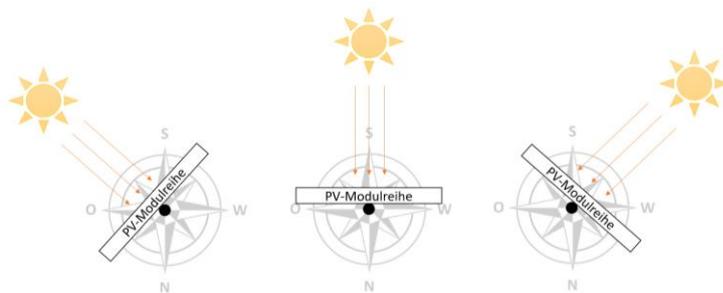


Abbildung 5 Prinzip des Ost/West-Trackings. Wenn die Sonne im Osten (O) aufgeht (Pfeile = Sonnenstrahlen), dreht ein Motor eine horizontale Achse (schwarzer Punkt), die in Nord/Süd-Richtung verläuft. Daran ist ein Gestell befestigt, woran wiederum die PV-Module befestigt sind (PV-Modulreihe). Die PV-Module sind in Seitenansicht dargestellt. Wenn sich die Sonne Richtung Westen bewegt, dreht auch der Motor die Achse nach Westen, sodass die einfallenden Sonnenstrahlen möglichst im 90° Winkel auf die Moduloberfläche treffen. Die zweidimensionale Ansicht täuscht jedoch, da die Sonne je nach Breitengrad, Jahreszeit und Tageszeit verschiedene Elevationen erreicht und somit perfekte Orthogonalität bei einer einachsigen Nachführung selten erzielt werden kann (vgl. Abbildung 9). Je näher sich die Ost/West-Trackinganlage am Äquator befindet, desto optimaler fallen die Sonnenstrahlen auf die Module. Die Informationen stammen vom firmeninternen Monitoringportal der CEE Operations und Vor-Ort-Besichtigungen der Anlage (eigene Abbildung).

Wie sich das Ost/West-Tracking im Tagesertrag widerspiegelt, ist in Abbildung 6 zu erkennen.

Die Ost/West-Tracker erzielen einen Mehrertrag von 34,78 % im Vergleich zum 0 ° Sensor und 16,36 % Mehrertrag im Vergleich zum Südsensor. Die Trackingphase verläuft zwischen den Maxima des orangenen Funktionsverlaufs von circa 10:30 Uhr bis 16:15 Uhr (vgl. Abbildung 6).

Um 10:30 Uhr sind die Tracker maximal nach Osten ausgerichtet, was 46 ° Ostneigung entspricht (vgl. Abbildung 7). Das ist gleichbedeutend mit -46 ° Westneigung. Die Trackingbewegung erfolgt gleichmäßig in Form einer Geraden bis 16:15 Uhr, wo die maximale Westneigung von 46 ° erreicht ist (vgl. Abbildung 7). Es kommt zu einem lokalen Minimum im Anlagenertrag zur Zeit der 0 ° Ausrichtung (vgl. Abbildung 6) aufgrund einer Azimutabweichung der Tracker von der Ost/West-Ausrichtung (vgl. Anhang 17). Je weniger die Trackerachse von der exakten Ost/West-Ausrichtung abweicht, desto geringer fällt die Differenz zwischen Maxima und Minimum aus (vgl. Anhang 17).

Bei tiefstehender Sonne würden sich die Modulreihen gegenseitig verschatten, wenn sich diese ausschließlich nach dem Stand der Sonne ausrichten würden. Um diese Verschattung zu verhindern, ist in PVFs normalerweise ein Backtrackingalgorithmus installiert: Die Tracker bewegen sich vor Erreichen der Maximalposition morgens und nach Erreichen der Maximalposition abends wieder zurück zu 0 ° Neigung (Dolara et al. 2012: 526). In Abbildung 7 dauert die Backtrackingphase morgens von circa 05:30 Uhr bis 08:30 Uhr und abends von circa 18:00 Uhr bis 21:00 Uhr.

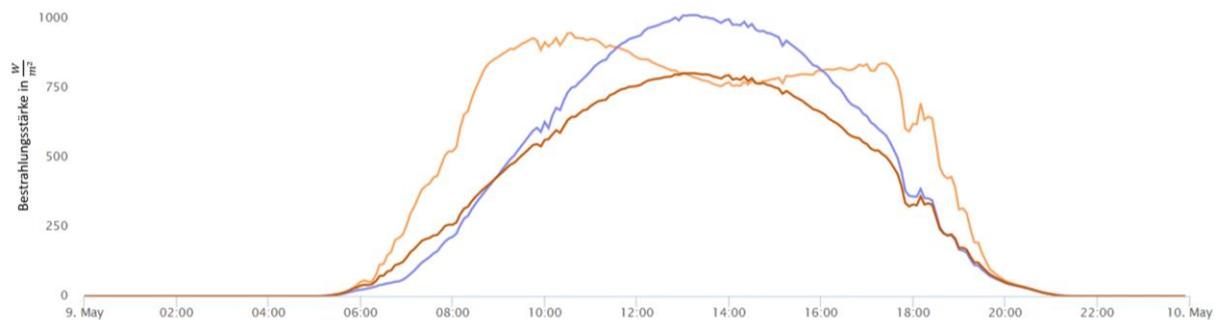


Abbildung 6 Bestrahlungsstärke der PVF X am 09.05.2022 im Tagesverlauf. Die Bestrahlungsstärke in $\frac{W}{m^2}$ wird am 09.05.2022 in X an einem nahezu wolkenlosen Tag gemessen. Der orangene Funktionsverlauf beschreibt ein trackendes Pyranometer, der dunkelrote Funktionsverlauf gehört zu einem horizontalen, fixen Pyranometer und der blaue Funktionsverlauf zeigt ein Pyranometer mit fixer 25 ° Neigung und Südausrichtung. Das Bild ist ein Screenshot aus dem firmeninternen Monitoringportal der CEE Operations.

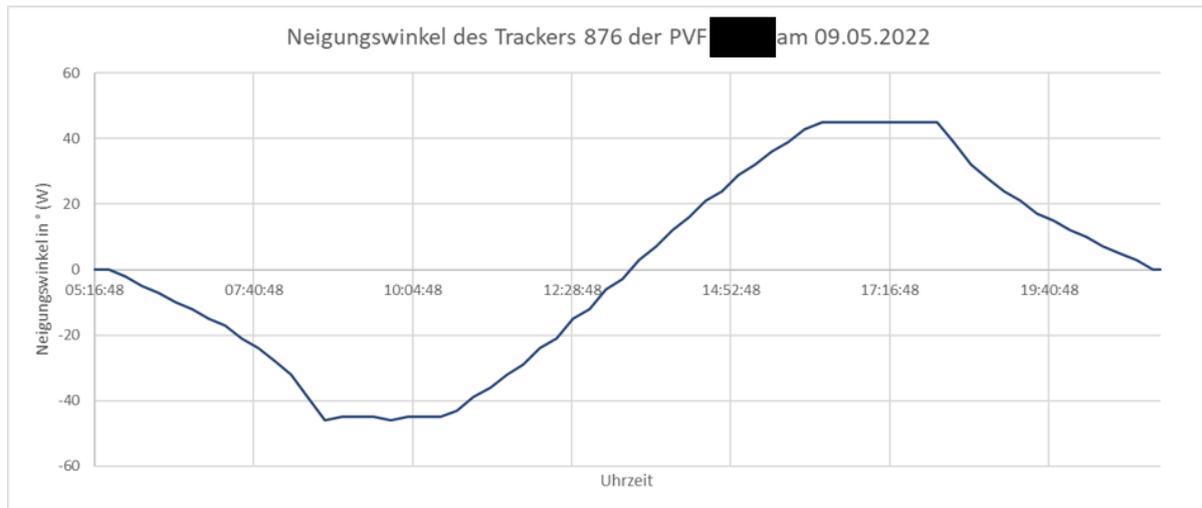


Abbildung 7 Neigungswinkel des Trackers 876 der PVF X am 09.05.2022. Der Neigungswinkel ist in ° Westneigung angegeben. Die Daten stammen aus dem firmeninternen Monitoringportal der CEE Operations.

2.2.2 Einflussgrößen

Im Vergleich zu einer Anlage mit fest installierten Modulen ist der Mehrertrag einer Trackinganlage von mehreren Faktoren abhängig. Das jeweils angewendete Trackingsystem (Mousazadeh et al. 2009: 1814.f), die Trackersteuerung (vgl. Fuentes-Morales et. all 2020), der Standort, die Wetterverhältnisse und die Jahres- und Tageszeit (Chaidoulis/Karanikolas 2020: 82) wirken sich auf den Ertrag aus. Diese Größen werden im Folgenden näher erklärt.

Das angewendete Trackingsystem beschreibt, welche Achsen zum Tracking verwendet werden und ob ein Motor als Antrieb genutzt wird. Alternativen zum Ost/West-Tracking sind beispielsweise das Drehen um die horizontale Achse, die in Ost/West-Richtung verläuft und in Nord/Süd-Richtung trackt oder das Drehen um zwei Achsen. Das Tracken in Ost/West-Richtung kann jährlich circa 15 % Mehrertrag im Vergleich zum Tracken in Nord/Süd-Richtung bewirken (Mousazadeh et al. 2009: 1804). Dies wurde theoretisch anhand verschiedener Standortdaten ermittelt. Zweiachsiges Tracking kann jährlich circa 10 % mehr Energie erzeugen als das Tracken in Ost/West-Richtung (Mousazadeh et al. 2009: 1814).

Bei Direktstrahlung gilt: Je größer der maximal zulässige Neigungswinkel des Trackingsystems ist, desto länger kann die Sonne pro Tag getrackt werden, desto mehr Ertrag kann produziert werden: In Abbildung 7 beträgt dieser 46°. Zwischen Backtracking und Trackingphase bleibt der Tracker fast zwei Stunden lang auf 46° stehen. Ein Tracker, der während dieser Zeit noch weiter trackt, kann einen Mehrertrag erbringen.

Auch der Standort übt einen Einfluss auf den Mehrertrag aus, aufgrund verschiedener Klima- und Wetterbedingungen und in Abhängigkeit des Breitengrads (Mousazadeh et al. 2009: 1805). Am Äquator steht die Sonne die meiste Zeit orthogonal zu einem Ost/West-Tracker, weshalb dort die Energiegewinne dieses Trackingsystems am größten sind (Bahrami et al. 2016: 904). Je größer der Breitengrad, desto geringer ist die Elevation der Sonne (vgl. Hoffmann 2012), desto geringer der Mehrertrag. Bei Ost/West-Trackern ist ab dem 64. Breitengrad der Ertrag geringer als bei einem optimal orientierten, fest aufgestellten Modul (Bahrami et al. 2016: 905). Ab dem 57. Breitengrad erzielt ein

Nord/Süd-Tracker einen größeren Ertrag als ein Ost/West-Tracker (Bahrami et al. 2016: 905). Eine Karte der prozentualen Mehrerträge des zweiachsigen Trackings gegenüber optimaler, fester Modulneigung ist in Anhang 2 abgebildet: Im Gegensatz zum Ost/West-Tracking können in hohen Breitengraden, zum Beispiel im Norden Schwedens, durch zweiachsiges Tracking bis zu 60 % mehr Energie produziert werden (Häberlin 2010: 688).

Die Elevation der Sonne ist nicht nur vom Breitengrad, sondern auch von der Tages- und Jahreszeit abhängig: Die Sonne weist im Sommer und zur Mittagszeit die größte Elevation auf (vgl. Abbildung 9). Die absoluten Energiegewinne sind im Sommer größer als im Winter (Quaschnig 2019: 89.f). Bei zweiachsigen Trackern können die prozentualen Mehrerträge im Winter mit mehr als 300 % gegenüber der Horizontalen an einem wolkenlosen Tag deutlich größer ausfallen als im Sommer mit circa 50 % Mehrertrag gegenüber der Horizontalen (vgl. Anhang 1). Dies wurde für den 50. Breitengrad berechnet.

Verbunden mit Jahreszeit und Standort sind auch die Wetter- und Klimaverhältnisse: Dänemark weist eine jahresdurchschnittliche Anzahl von 4,7 Sonnenstunden pro Tag auf, in Spanien sind es 6,8 Sonnenstunden pro Tag (vgl. Effe o.J.). Tracking bei bedecktem Himmel, beziehungsweise bei fast ausschließlich diffuser Strahlung, ist jedoch kontraproduktiv (Quesada et al. 2015: 147), da auf der horizontalen Fläche mehr Diffusstrahlung eingefangen werden kann als auf einer geneigten Fläche (vgl. Abbildung 8).

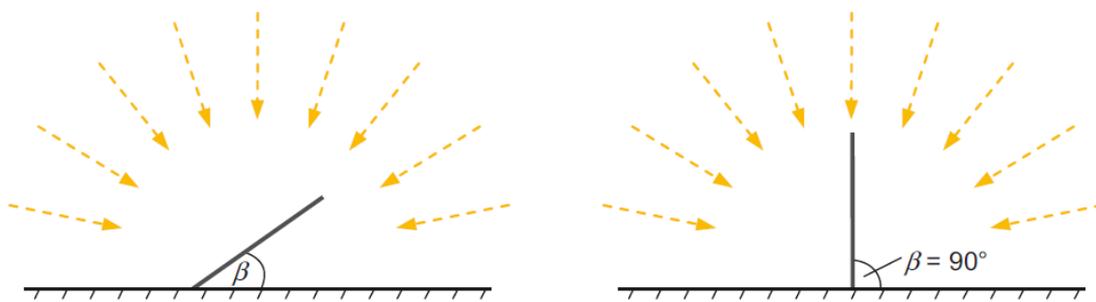


Abbildung 8 Isotroper Ansatz Diffusstrahlung. Es wird angenommen, dass diffuses Licht aus allen Richtungen gleichmäßig auf eine betrachtete Fläche strahlt, die das PV-Modul repräsentiert. Dies ist durch die gelben Pfeile symbolisiert. Alle diese Strahlen würden auf eine horizontale Fläche treffen. Ist die Fläche wie im rechten Teil der Abbildung um 90° zur Horizontalen gedreht, kann nur die Hälfte der Strahlen durch das PV-Modul aufgenommen werden. Der Ertrag des Moduls würde sich halbieren. Je größer die Abweichung von der Horizontalen ist, desto weniger Diffusstrahlung kann aufgenommen werden, desto größer wird der Minderertrag, wie im linken Bild dargestellt (Mertens 2022: 55).

Die Diffusstrahlung strahlt selten aus allen Richtungen gleichmäßig, sondern variiert in Abhängigkeit des Wolkenbildes (Mertens 2022: 55). Bei geringerer Bewölkung kann eine Helligkeitszunahme im Bereich der Sonne gemessen werden (Mertens 2022: 55). Morgens und abends kann der Horizont am hellsten leuchten (Quaschnig 2019: 87). Außerdem kann durch Trackerausrichtung zu helleren Stellen im Wolkenhimmel mehr Bestrahlungsstärke gemessen werden als bei einer Ausrichtung zur 0° Position oder astronomische Trackingposition (Pineda/Arredondo 2012: 2905).

Prozentuale Angaben, wie viel Mehrertrag bei einem stark bewölkten Himmel durch die fixe 0° Position im Vergleich zum astronomischen Tracking erzielt werden können, variieren deshalb stark in Abhängigkeit der gemessenen Bestrahlungsstärken und anderer bereits genannter Einflussfaktoren: In Detroit konnte die horizontale Ausrichtung beispielsweise im Tagesmittel bei starker Bewölkung bis zu 47 % Mehrertrag im Vergleich zu einer astronomischen Nachführung erbringen (Kelly/Gibson 2009: 2097), ein Durchschnittswert von 4 bedeckten Tagen im Herbst und Frühling. In

Montreal ist der prozentuale Mehrertrag der fixen 0° Position an bewölkten Tagen im Vergleich zur astronomischen Trackingposition im Winter größer als im Sommer: Beispielsweise wurden am 29. Dezember 32,6 % mehr Energie produziert und am 25. Juni 7,9 % (Quesada et al. 2015: 152).

2.2.3 Trackersteuerungen

Mit dem Ziel, die bereits genannten Einflussfaktoren so zu berücksichtigen, dass unter wirtschaftlicher Nutzung in Summe ein optimaler Ertrag erzielt werden kann, sind in der Literatur nach Fuentes-Morales et al. (2020: 203) folgende Kategorien der Steuerungsmethoden bekannt: Open Loop beziehungsweise astronomische Steuerung, Closed Loop beziehungsweise Sensorsteuerung und Hybrid Loop beziehungsweise eine Kombination beider Methoden (Fuentes-Morales et al. 2020: 203; Hammoumi et al. 2021: 76).

Die bereits erwähnte astronomische Steuerung arbeitet ohne einen Sensor zur Bestimmung der Sonnenposition (Fuentes-Morales et al. 2020: 206). Stattdessen wird diese in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Standort und Jahres- und Tageszeit durch einen Algorithmus errechnet (Fuentes-Morales et al. 2020: 206). Der Tracker richtet sich in Abhängigkeit von der Zeit so aus, dass die Modulebene möglichst orthogonal zu den theoretisch errechneten, einfallenden Sonnenstrahlen steht (vgl. Kapitel 2.3). Ein Flussdiagramm einer astronomischen Steuerung ist in Anhang 3 abgebildet. Die astronomische Steuerung arbeitet dabei unabhängig vom Einflussfaktor der Wetterverhältnisse (Fuentes-Morales et al. 2020: 207).

Bei der Sensorsteuerung erfassen Sensoren wie Light Dependent Resistors (LDRs) oder Pyranometer die bestmögliche Ausrichtung zur Sonne: Die gemessene Bestrahlungsstärke ist bei optimaler Ausrichtung der Sensoren zur Sonne am größten (Fuentes-Morales et al. 2020: 208.f). Bei nicht optimaler Ausrichtung wird der Tracker in die Richtung nachgeführt, in der eine größere Bestrahlungsstärke gemessen wird (Fuentes-Morales et al. 2020: 208.f). Ein Nachführimpuls kann beispielsweise durch künstliche Verschattung der Sensoren verursacht werden, mit Hilfe eines nach oben geöffneten Hohlzylinders, der einen LDR umschließt (vgl. Anhang 4). Ein Flussdiagramm einer Sensorsteuerung ist in Anhang 5 abgebildet.

Die Funktionalität einer Sensorsteuerung wird allerdings durch Wolken beeinflusst: Bei bewölktem Himmel richten sich die Sensoren auf der Suche nach der hellsten Stelle im Himmel zur nächsten, gemessenen hellsten Stelle aus (Pineda/Arredondo 2012: 2905). Das kann die verdeckte Sonne sein oder andere, aufgrund von Wolkenreflektionen zufällig auftretende, helle Stellen im Himmel (Pineda/Arredondo 2012: 2905). Die gefundene helle Stelle muss dabei aber nicht unbedingt auch die hellste Stelle im Himmel sein (vgl. Anhang 6). Eine Sensorsteuerung, die sich bei einem permanent ändernden Wolkenhimmel kontinuierlich oder schrittweise neu ausrichtet, verbraucht auch mehr Trackingenergie als die astronomische Steuerung. Weitere Nachteile sind höhere Kosten aufgrund des benötigten Sensors und eine mögliche Degradation des Sensors im Verlauf der Anlagenbetriebsphase, zum Beispiel durch Verschmutzung, was zu Trackingfehlern führen würde (Fuentes-Morales et al. 2020: 208.f).

Der Vorteil der Sensorsteuerung im Vergleich zur astronomischen Steuerung ist, dass die Sensorsteuerung auf realen Daten basiert, die astronomische Steuerung jedoch auf theoretischen Daten. Dadurch kann die Sensorsteuerung in Abhängigkeit von der Genauigkeit des verwendeten, astronomischen Algorithmus, genauer tracken (Fuentes-Morales et al. 2020: 209).

Hybrid Loop-Systeme versuchen, die Vorteile beider Steuerungsmethoden zu nutzen: Wenn beispielsweise Wolken aufziehen, dann kann die Sensorsteuerung deaktiviert werden und die astronomische Steuerung übernimmt das Tracking (Fuentes-Morales et al. 2020: 210-213).

Sensoren können nicht nur direkt zum Tracking verwendet werden, sondern auch zur Unterscheidung zwischen Direkt- und Diffusstrahlung dienen (Kelly/Gibson 2009: 2101). Wird ein bestimmter Grenzwert gesetzt, nach dessen Unterschreitung sich Tracking nicht mehr lohnt, kann das angewandte Steuerungssystem unterbrochen werden: Der Tracker kann sich entweder in Richtung 0° ausrichten (Kelly/Gibson 2009: 2101), um einen optimalen Ertrag zu erzielen oder aufhören zu tracken durch Verharrung an der Trackerposition der Grenzwertunterschreitung (Rubio et al. 2007: 2178; 2179), um dadurch Trackingenergie einzusparen. Der Grenzwert ist abhängig von der Jahres- und Tageszeit und dem Standort (vgl. Anhang 7): Gegen Mittag ist der Grenzwert am größten und im Sommer ist der Grenzwert größer als im Winter (Quesada et al. 2015: 151).

Durch ein Sensorarray, das in verschiedene Himmelsrichtungen ausgerichtet ist, ist es möglich, die hellste Stelle in einer Wolkenschicht zu detektieren (vgl. Pineda/Arredondo 2012). Gegenüber einer horizontalen Modulausrichtung wurde unter Berücksichtigung der aufgewendeten Trackingenergie an einem wechselhaft bewölkten Tag in Bogotá, Kolumbien, ein Mehrertrag erzielt (Pineda/Arredondo 2012: 2908), allerdings wurden keine repräsentativen Messungen durchgeführt.

Durch diese vorgestellten Methoden ist es möglich, den Einflussfaktor der Wetterverhältnisse in einem Open oder Closed Loop-System zu berücksichtigen beziehungsweise zu optimieren.

Außerdem können Systeme der künstlichen Intelligenz bei den verschiedenen Trackersteuerungen eingesetzt werden, basierend auf Unschärfelogik und Neuralen Netzwerken (AL-Rousan et al. 2018: 2559). Anders als bei Fuentes-Morales et al. (2020: 203) werden diese Systeme in anderen Quellen auch als eigenständige Gruppe kategorisiert (AL-Rousan et al. 2018: 2559). Mit künstlicher Intelligenz ist es beispielsweise möglich, eine Vorhersage der täglichen Bestrahlung zu treffen (AL-Rousan et al. 2018: 2562). Durch das eigenständige Lernen des Programms, können auch die theoretisch ermittelten Trackingpositionen in Abhängigkeit weiterer Einflussfaktoren wie Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit oder Temperatur optimiert werden (Kayri/Gencoglu 2017: 213).

2.3 Realisierung einer astronomischen Ost/West-Trackersteuerung

Um einen Tracker astronomisch in Ost/West-Richtung der Sonne auszurichten, muss der Stand der Sonne eindeutig bestimmt sein. Wie bereits in Abbildung 4 beschrieben, sind dafür folgende Größen notwendig: Die Elevation γ_s und der Sonnenazimut α_s . Diese sind vor allem orts- und zeitabhängig (Quaschnig 2019: 83). Die Formeln für die Berechnung dieser Größen nach dem DIN-Algorithmus sind in Anhang 8 dargestellt. Je nach Genauigkeit können weitere Größen wie die Höhenlage des Standortes (vgl. Reda/Andreas 2008) oder die Brechung des Sonnenlichtes an der Atmosphäre berücksichtigt werden (Quaschnig 2019: 85).

Abbildung 9 zeigt ein Sonnenbahndiagramm für Berlin, bei dem die Elevation in Abhängigkeit vom Sonnenazimut dargestellt ist.

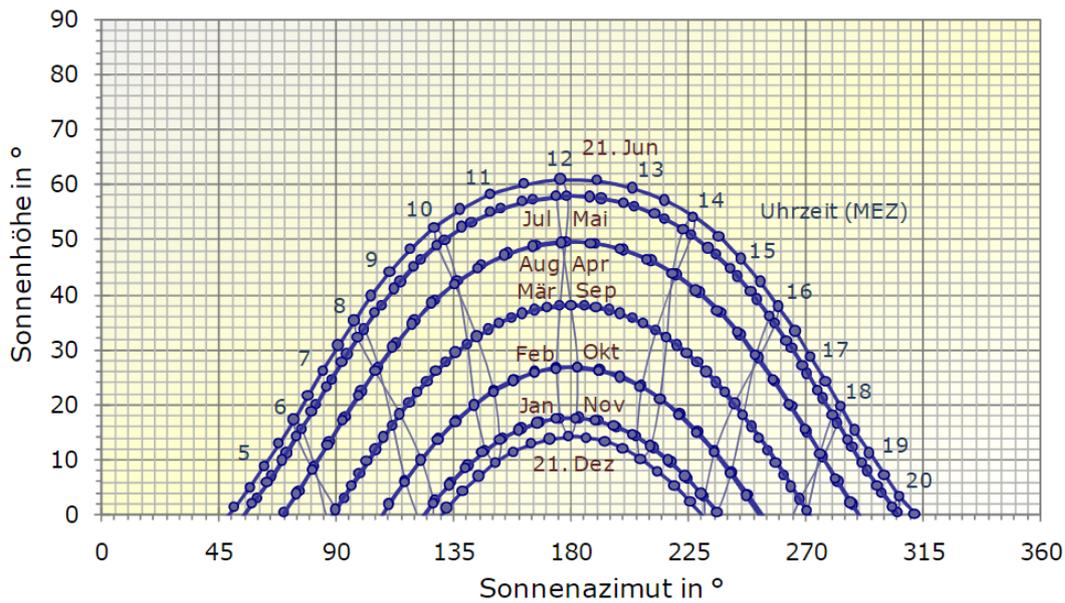


Abbildung 9 Sonnenbahndiagramm für den Standort Berlin. Der Breitengrad beträgt $52,3^\circ$, der Längengrad $13,2^\circ$. Die Sonnenhöhe ist in Abhängigkeit vom Sonnenazimut dargestellt. Die Uhrzeitangaben im Diagramm sind in mitteleuropäischer Zeit (MEZ) angegeben, gleichzusetzen mit der deutschen Winterzeit oder auch dargestellt in Form der Zeitzone UTC+1. Eingezeichnet sind unter anderem die Sommersonnenwende am 21. Juni als längster Tag im Jahr mit der größten Elevation und die Wintersonnenwende am 21. Dezember als kürzester Tag im Jahr mit der geringsten Elevation (Quaschnig 2019: 84).

Der Neigungswinkel des Trackers soll in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt werden. Die Module, die in der Trackingebene liegen, sind so auszurichten, dass sie im Idealfall orthogonal zum einfallenden Sonnenlicht stehen (vgl. Abbildung 4). Aufgrund des einachsigen Trackings fehlt der Freiheitsgrad in Nord/Süd-Richtung. Deshalb wird der Tracker so zur Sonne ausgerichtet, dass der Verbindungsvektor zwischen Sonnenmittelpunkt und Betrachtungspunkt auf der Trackingachse immer orthogonal zur Trackingebene liegt (vgl. Abbildung 10).

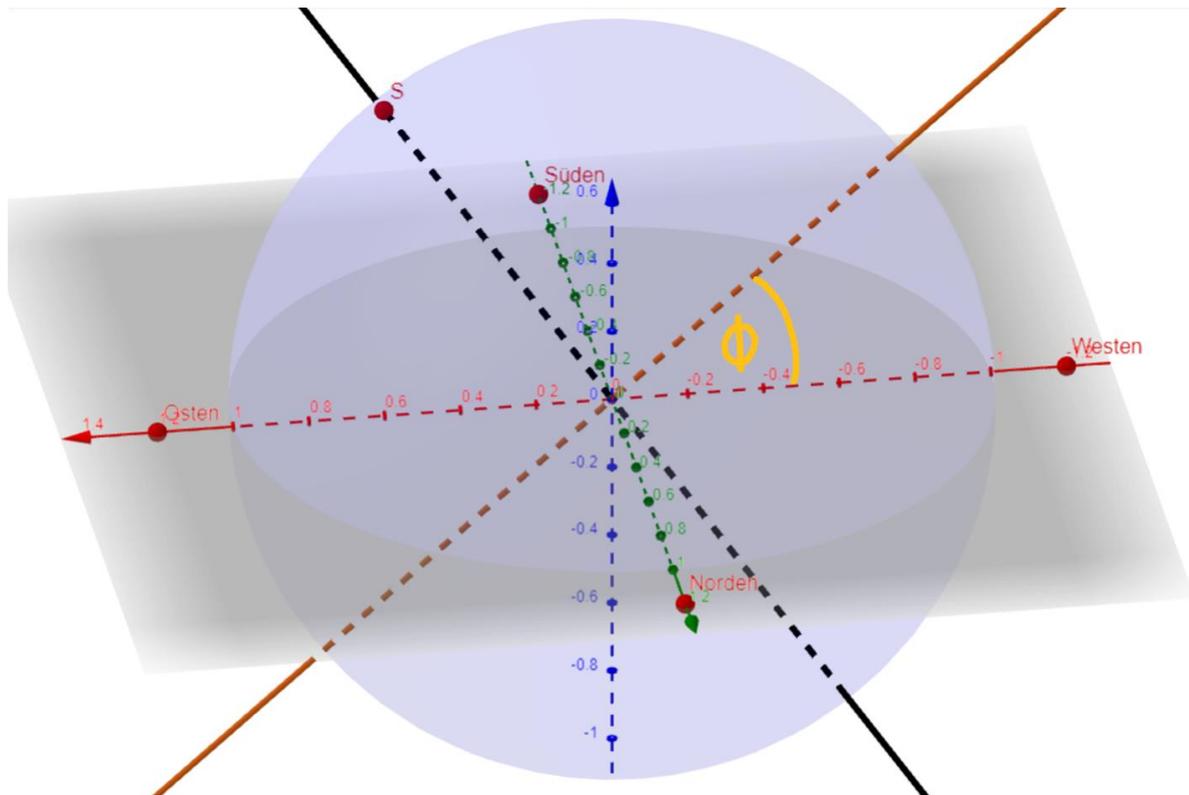


Abbildung 10 Prinzip der Ost/West-Trackersteuerung. Der Betrachtungspunkt ist der Ursprung, der auf der grün gefärbten Trackingachse liegt, die in Nord/Süd-Richtung verläuft und auf der die trackenden Module befestigt sind (vgl. Anhang 9). In dieser Darstellung werden die Module, die eigentlich Ebenen sind, durch die orangene Gerade ersetzt. Diese ist immer orthogonal zur Nord/Süd-Achse ausgerichtet. Der Verbindungsvektor zwischen Sonne (\vec{S}) und Ursprung ist schwarz gefärbt. Die orangene Trackinggerade ist orthogonal zum schwarzen Verbindungsvektor zwischen Betrachtungspunkt und Sonnenmittelpunkt auszurichten, um optimalen Ertrag zu erzielen. Der gesuchte Neigungswinkel des Trackers ϕ ist gelb eingezeichnet (eigene Abbildung).

Hat die Sonne den Ortsvektor $\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$, entspricht dies auch dem Verbindungsvektor zwischen Sonne und Ursprung. Die 3-D-Koordinaten werden aus Azimut und Elevation umgewandelt.

Damit die für die Wandlung erforderlichen Gleichungen genutzt werden können, deren Größen in Abbildung 11 eingezeichnet sind, muss der Azimut, der laut Abbildung 4 mit Norden = 0° und Osten = 90° definiert ist, gespiegelt werden, sodass der Norden = 0° bleibt, aber Westen = 90° wird:

$$\alpha_{s,neu} = 360^\circ - \alpha_s \quad (5)$$

Außerdem wird die Elevation laut Abbildung 4 auf der Horizontalachse mit 0° und auf der Vertikalachse mit 90° bemessen. In Abbildung 11 steht der Winkel $\gamma_{s,neu}$ von der Vertikalachse in folgendem Zusammenhang mit der Elevation γ_s :

$$\gamma_{s,neu} = 90^\circ - \gamma_s \quad (6)$$

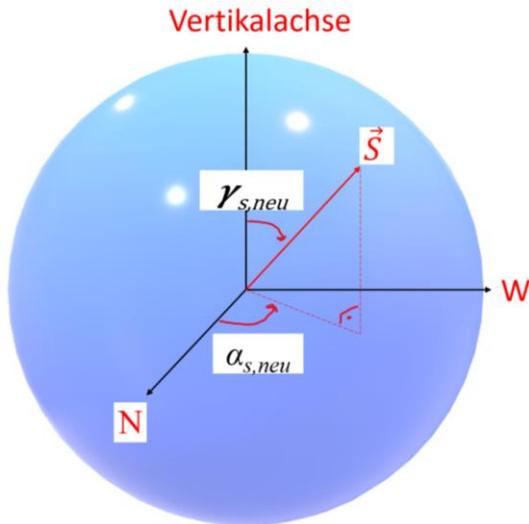


Abbildung 11 Grafik zur Wandlung der kartesischen Koordinaten in Kugelkoordinaten. Die Achse, die nach Norden zeigt, ist mit „N“ gekennzeichnet. Der Azimut, der in der Grafik mit $\alpha_{s,neu}$ beschrieben ist, nimmt im Norden den Wert 0° und im Westen (W) 90° an. An Stelle der Elevation kommt in dieser Grafik der Winkel $\gamma_{s,neu}$ vor, der auf der Vertikalachse $= 0^\circ$ und auf der Horizontalachse $= 90^\circ$ ist. Die Sonne (\vec{S}) wird durch die 3-D-Koordinaten S_1 , S_2 und S_3 beschrieben (eigene Abbildung).

Nun können folgende Formeln für die Wandlung benutzt werden, damit die Sonne in Kugelkoordinatenform vorliegt (vgl. Uni Stuttgart 2013):

$$S_1 = \sin(\gamma_{s,neu}) \cdot \cos(\alpha_{s,neu}) \quad (7)$$

$$S_2 = \sin(\gamma_{s,neu}) \cdot \sin(\alpha_{s,neu}) \quad (8)$$

$$S_3 = \cos(\gamma_{s,neu}) \quad (9)$$

Die Trackergerade besitzt den Richtungsvektor $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ k \end{pmatrix}$. Die x-Koordinate $= 0$, da der Ost/West-Tracker nicht in Nord/Süd-Richtung tracken kann (vgl. Abbildung 10). Die y-Koordinate $= 1$, da diese Koordinate die Länge des Trackers symbolisiert, die nicht relevant ist, aber für die Berechnung konstant sein muss. k beschreibt die Höhenvariation des Trackers, die sich abhängig vom Stand der Sonne verändert und ermittelt werden muss.

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein, damit der Richtungsvektor der Sonne orthogonal zum Richtungsvektor der Trackergeraden liegt:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ k \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = 0 = s_2 + k \cdot s_3 \quad (10)$$

$$\frac{-s_2}{s_3} = k \quad (11)$$

Der Winkel ϕ zwischen Trackergerade und positiver y-Achse (vgl. Abbildung 10) ergibt sich für Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang zu: $\phi = \arctan(k)$. Dieser Winkel kann nun über einfache funktionale Zusammenhänge in die gewünschte Neigungswinkeldarstellung umgewandelt werden. Soll beispielsweise die Maximalposition der Westneigung des Trackers bei 90° und die Maximalneigung im Osten bei -90° liegen, dann muss ϕ mit -1 multipliziert werden.

2.4 Vorstellung der Photovoltaik-Freiflächenanlage X

Die in dieser Arbeit untersuchte Freiflächenanlage namens PVF X mit 44,2 MWp installierter Leistung, welche seit dem 04.11.2020 in Betrieb ist, befindet sich im Norden von Dänemark, in der Nähe des Ortes X (vgl. Abbildung 12). Der Untergrund der PVF ist mit Gras bewachsen.

Die am nächsten gelegene Wetterstation in der Umgebung der PVF X hat im Jahresdurchschnitt eine Globalstrahlung von circa $1.016 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$ gemessen (Wang et al. 2013: 19). Im Jahresdurchschnitt ist der Himmel zu circa 55 % mit Wolken bedeckt, wobei im Winter der Himmel mit bis zu 77 %, gemessen im Februar, stärker bedeckt ist als im Sommer (Wang et al. 2013: 21). Die Globalstrahlung setzt sich im Jahresdurchschnitt etwa zur Hälfte aus Direkt- und Diffusstrahlung zusammen (Wang et al. 2013: 28). Die Monate mit der größten, absoluten Diffusstrahlung sind Mai bis Juli (Wang et al. 2013: 28).

<Das Bild ist aus firmeninternen Gründen entfernt worden>

Abbildung 12 Luftbildaufnahme der PVF X (Google Earth Pro 2022).

Dem Schema des grundlegenden Aufbaus von PV-Anlagen nach Abbildung 1 vom Netzübergabepunkt bis zu den Modulen folgend, gibt es eine Übergabestation, die an das dänische Stromnetz der Spannungsebene 60 kV angeschlossen ist. An 12 Transformatoren mit je 3,15 MW Nennleistung sind insgesamt 324 Strangwechselrichter mit je 105 kW Nennleistung angeschlossen.

Dabei sind an 51 Wechselrichtern fest installierte, mit 25° Neigung nach Süden ausgerichtete, Module installiert. Dieser Teil des Parks befindet sich im Norden und ist in Abbildung 12 grau eingekreist. An die restlichen Wechselrichter sind Module angeschlossen, die sich auf 1294 aktiv astronomisch gesteuerten, einachsigen Ost/West-Trackerreihen befinden. Die Zuordnung der Wechselrichter mit festen und trackenden Modulen zu den Trafos ist in Abbildung 13 dargestellt.

Transformator	Fixed	Tracker
1	0	alle
2	0	alle
3	0	alle
4	0	alle
5	0	alle
6	alle	0
7	1-2	3-27
8	0	alle
9	0	alle
10	1-22	23-27
11	0	alle
12	0	alle

Abbildung 13 Zuordnung der Wechselrichter mit festen und trackenden Modulen zu den Trafostationen der PVF X. In Spalte 2 und 3 ist die Zuordnung der Anzahl Wechselrichter mit fest installierten, 25° Neigung und nach Süden ausgerichteten Modulen (Fixed) und ost/west-trackenden Modulen (Tracker) zu den Nummern der Trafostationen (Transformator, Spalte 1) beschrieben. An Trafostation 6 sind nur fest installierte Module angeschlossen, an die Trafostationen 7 und 10 sowohl fest installierte als auch trackende Module und an den Rest nur trackende Module. Beispiel: An Transformatorstation Nummer 7 sind die Wechselrichter Nummer 3 bis 27 mit trackenden Modulen ausgestattet. Die Informationen basieren auf der internen Anlagendokumentation der Technischen Betriebsführung der CEE Operations.

Für diese Arbeit sind nur die Anlagenteile mit installierten Trackern relevant. 4 Tracker sind von einer anderen, nicht nennbaren Firma hergestellt als die restlichen. Die Trackerreihen haben verschiedene Längen: 59 % sind 78 m lang, 35 % haben eine Länge von 52 m und 8 % weisen eine Länge von 26 m auf. Beispielfhaft ist eine Trackerreihe der PVF X in Anhang 9 dargestellt.

Die Tracker werden als Stand-Alone-System betrieben: Ein 30 Wp Panel lädt einen 24 V Akku mit 6 Ah, der einen 24 V Motor versorgt, der die Trackerachse bewegt. Aufgrund von Tiefenentladung der Akkus im November 2021 wurden wenige Tracker testweise mit einem weiteren 30 Wp Panel und einem weiteren 6 Ah Akku nachgerüstet. Das betrifft die Trackernummern 823 bis 830. Trotzdem kann die Versorgungsspannung der Tracker in Abhängigkeit der Wetterverhältnisse nicht ganzjährlich gewährleistet werden. Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit, den Energieverbrauch der Tracker weiter zu senken, um eine erneute Tiefenentladung zu verhindern.

Insgesamt sind circa 100.000 monokristalline, bi-faziale PV-Module im Park installiert, wobei immer 26 Module in Reihe verschaltet einen String bilden und 12 Strings auf jeden Wechselrichter geführt werden.

Neben Strom- und Spannungsmessungen an den jeweiligen Anlagenkomponenten werden an verschiedenen Stellen im Park Sensordaten erfasst, wovon die wichtigsten die Bestrahlungsstärke, die Windgeschwindigkeit und der Trackerneigungswinkel sind.

Im Park ist ein horizontales Pyranometer bei Trafostation 7 verbaut, zwei nach Süden ausgerichtete, 25 ° geneigte Pyranometer bei Trafostation 6 und 10 und 5 trackende Pyranometer bei Trafostation 2, 4, 5, 8 und 12. Durch einen Vergleich der Proportionalität zwischen Bestrahlungsstärke und Anlagenenertrag wie in Abbildung 2, können beispielsweise Abregelungen erkannt werden.

Ab Windgeschwindigkeiten von $> 13,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, die mindestens 10 Minuten lang anhalten oder Böen ab $16,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ müssen die Tracker in die sichere Sturmposition von 25 ° West fahren, um die Windangriffsfläche zu reduzieren und Schäden am Park zu vermeiden.

Anhand der Neigungswinkel kann die Funktionalität der Tracker überprüft werden. Fehlerhafte Tracker weichen wie in Anhang 21 dargestellt von den Neigungswinkeln der übrigen ab.

3 Hard- und Software für die Analyse

3.1 Eigenbau Sensorstation RAGMAR

3.1.1 Aufbau und Anwendung

Mithilfe der selbstgebauten ost/west-trackenden und programmierbaren Sensorstation namens RAGMAR (vgl. Abbildung 14) wird eine optimierte Diffuslichtsteuerung entwickelt und auf der PVF X getestet, um eine quantitative Aussage über Mehrertrag und Energieeinsparung der neuen Steuerung treffen zu können, die in dieser Arbeit entwickelt wird.



Abbildung 14 Ost/west-trackende und programmierbare Sensorstation RAGMAR. RAGMAR wurde am 30.05.2022 auf der PVF X aufgebaut. Im Hintergrund sind die Trackerreihen der PVF X erkennbar, die sich auf fast maximaler West-Position befinden. Die Umzäunung RAGMAR's dient als Schutz vor Schafen (eigenes Foto).

Zur Fixierung RAGMAR's dient ein vertikaler Holzpfahl, der mit Abspannseilen fixiert und durch einen Metallspieß fast einen Meter tief im Boden verankert ist.

Die Spannungsversorgung ist in Form eines Stand-Alone-Systems verwirklicht in Anlehnung an die Tracker der PVF X: Ein 10 Wp Solarpanel ist durch einen Gleichspannungswandler mit 16mal 9 V Li-Ionen-Blockakkumulatoren³ mit einer Gesamtkapazität von 9,6 Ah verbunden, die in silbernen Boxen unterhalb des PV-Moduls angebracht sind. RAGMAR's Eigenspannungsversorgungsmodul ist in Abbildung 14 fix nach Süden ausgerichtet.

Der Mikrokontroller „Arduino Due“ (vgl. Arduino 2022), der sich in der großen Plastikbox auf der Nordseite befindet, steuert RAGMAR. Die für die Ergebnisauswertung wichtigsten, angeschlossenen Sensoren sind 5 Umgebungslichtsensormodule des Typs „BH1750FVI“ (vgl. ROHM Semiconductor GmbH 2009), die Echtzeituhr „DS3231“ (vgl. Maxim Integrated 2015) und das Accelerometer des Modultyps „GY-61“ (vgl. Analog Devices 2009), verwendet zur Messung des Neigungswinkels und nachfolgend auch als Neigungssensor bezeichnet. Die Lichtsensoren haben die Form weißer Halbkugeln, eingelassen in das Holz des Trackers (vgl. Abbildung 14). Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise RAGMAR's befindet sich in Anhang 10.

Ein Schema der elektronischen Verschaltung mit allen angeschlossenen Komponenten und deren Funktionsbeschreibung ist in Anhang 11 dargestellt. Wenn man die Bilder des Anhangs 10 mit Abbildung 14 vergleicht, erkennt man auch visuell, in welche Richtung der Holz-Tracker trackt.

Nach Bau der Sensorstation und einer Vortestphase, in der Betriebsfehler behoben, Forschungen verschiedener Steuerungsmechanismen durchgeführt und ein verbesserter Algorithmus zur Optimierung

³ Obwohl die Akkus offiziell 9 V Blockakkumulatoren heißen, liegt die Zellspannung nur bei circa 8,2 V.

des Diffuslichtverhaltens entwickelt wurden, wurde RAGMAR am 31.05.2022 auf der PVF X zum Praxistest aufgebaut.

Dieser wird in 2 Perioden eingeteilt: Die erste Periode umfasst 9 auswertbare Tage vom 01.06.2022 bis zum 09.06.2022, danach waren die Akkus RAGMAR's aufgrund von Unterdimensionierung der Versorgungsspannung tiefenentladen. Nach Wiederinbetriebnahme der Station umfasst die 2. Messperiode 18 auswertbare Tage vom 22.06.2022 bis zum 12.07.2022. Die Daten der 2. Messperiode können jedoch nur hinsichtlich der Energieeinsparungen der angewendeten Steuerung ausgewertet werden, weil es zu einem Initialisierungszeitfehler von 22 Minuten gekommen ist (vgl. Kapitel 3.1.3).

Wichtig für die Ergebnisauswertung sind die Messwerte der zwei Umgebungslichtsensoren in Messebene, der Neigungswinkel des Neigungssensor und die Zeitmessung der Echtzeituhr. Im Folgenden wird die Qualität der Messwerte RAGMAR's untersucht, verbunden mit einer Einschätzung des Messfehlers.

3.1.2 Messunsicherheit Zeit

Die I²C-Echtzeituhr gibt ihre Daten direkt im verwendbaren Zeitformat aus: Sekunden, Minuten, Stunden, Tage, Monate und Jahre werden ausgelesen. Die Messunsicherheit der Frequenz kann mit circa 3 ppm angenommen werden (vgl. Anhang 12). Für die Messunsicherheit der Zeit bedeutet dies eine Abweichung von circa 0,6 ms im Betrachtungszeitraum (vgl. Anhang 12). Somit ist die Zeitmessung sehr genau und die Verwendung der Echtzeituhr für diese Anwendung geeignet.

Allerdings entsteht nicht nur durch die Messung mit der Echtzeituhr ein Fehler der ausgegebenen Zeit, sondern auch aufgrund der Initialisierungszeitdifferenz zwischen Programmupload und Start: Im Programmcode wird die Initialisierungszeit der Echtzeituhr einprogrammiert, das Programm auf den Mikrokontroller geladen und gestartet. Nach dem Start wird der Initialisierungsbefehl der Echtzeituhr ausgeführt. Das bedeutet, dass die einprogrammierte Zeit nicht der ausgegebenen Zeit entspricht. Die Differenz zwischen diesen Größen ist maßgeblich abhängig von der Uploadzeit, die im Mittel circa 35 s beträgt, aber je nach aktueller Leistung des PCs und Größe des Programms abweichen kann. Die mittlere Uploadzeit kann ausgeglichen werden, die zufällige Abweichung, die mit circa 10 Sekunden angenommen werden kann, nicht.

Während der Haupttrackerbewegung im Zeitraum von circa 10:30 Uhr bis 16:15 Uhr beträgt die Differenz des Neigungswinkels 92 ° (vgl. Abbildung 7). Dabei hängt der Zeitraum des Trackingvorgangs vom Datum ab: Da im Winter die Tage kürzer sind, ist auch der Zeitraum der Trackerbewegung kürzer als im Sommer. Bei einer nahezu linearen Trackerbewegung (vgl. Abbildung 7) ergibt sich für die Abweichung der Zeit von 10 s eine Abweichung des Neigungswinkels von⁴:

$$\frac{92^\circ}{(6 \cdot 60 - 15) \cdot 60 \text{ s}} \cdot 10 \text{ s} = 0,044^\circ \approx 0,05^\circ \quad (12)$$

Weitere Messunsicherheiten der Zeit wie zum Beispiel die Differenz der abgelesenen Zeit vom Handy oder Laptop zur realen Zeit werden vernachlässigt.

⁴ Messunsicherheiten werden immer aufgerundet.

Der Initialisierungszeitfehler der 2. Messperiode von 22 Minuten entspricht laut Formel (12) einer zusätzlichen Neigungswinkelabweichung von $5,87^\circ \approx 6^\circ$. Die erste Messperiode ist davon nicht betroffen.

Da die Zeitmessung der PVF X auf der Internetzeit basiert, ist der Fehler der PVF X zur realen Zeit zu vernachlässigen.

Zusammenfassend kann für die erste Messperiode eine Messunsicherheit der Zeit von circa 10 s im Vergleich zur Zeitmessung der PVF X angenommen werden, was einer Abweichung des Neigungswinkels von circa $0,05^\circ$ entspricht. Für die zweite Messperiode beträgt die Messunsicherheit der Zeit circa 22 min, was einer Neigungswinkelabweichung von circa 6° entspricht.

3.1.3 Messunsicherheit Neigungswinkel

Das verbaute Accelerometer misst den Neigungswinkel von RAGMAR's Tracker. Da es sich um einen Sensor handelt, dessen ausgegebene, analoge Spannung im internen Analog-Digital-Wandler (ADC) des Arduino Due gewandelt wird, muss eine Kalibrierung des Sensors erfolgen. Diese wird mit einem Geodreieck und einer kleinen Wasserwaage, befestigt am Geodreieck, durchgeführt (vgl. Abbildung 15).



Abbildung 15 Kalibrierung des Neigungssensors. Der Neigungssensor, der unterhalb des Trackers mit Silikon an der Trackingebene festgeklebt ist, wird mit Hilfe eines Geodreiecks kalibriert, an dem sich eine kleine Wasserwaage befindet. Für die endgültige Kalibrierung wurde die Wasserwaage mit Silikon am Geodreieck befestigt (eigenes Foto).

Nicht betrachtet werden die Datenblattangaben des Neigungssensors wie die Ausrichtungsfehler des Sensors: Der „Package Alignment Error“ (Analog Devices 2009: 3) beträgt $\pm 1^\circ$ und der „Interaxis Alignment Error“ (Analog Devices 2009: 3) $\pm 0,1^\circ$. Diese Größen werden vernachlässigt, da der Sensor ohne Hilfsmittel an der Unterseite der Trackerebene befestigt wurde und der dadurch entstandene Fehler wesentlich größer sein sollte als ein maschinell produziertes Bauteil. Stattdessen soll der resultierende Fehler des verbauten Sensors mit Hilfe einer Kalibrierung ermittelt werden.

Die Kalibrierung, die in Abbildung 16 dargestellt ist, beweist die im Datenblatt angegebene, lineare Abhängigkeit zwischen Bit-Wert und Neigungswinkel (Analog Devices 2009: 10).

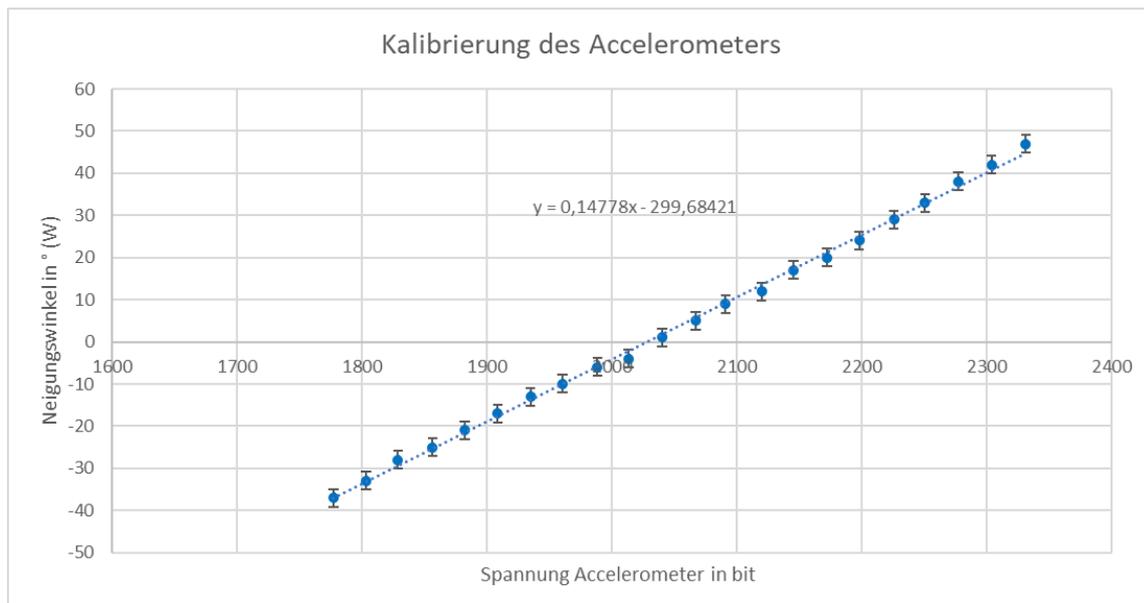


Abbildung 16 Kalibrierung des Accelerometers. Der Output des Accelerometers in Form einer Spannung, die AD-gewandelt in Form eines Bit-Wertes vom Programm erfasst wird, ist auf der x-Achse abgebildet. Die y-Achse zeigt den durch die Kalibrierung ermittelten Neigungswinkel in ° Westneigung an. Fehlerindikatoren in x- und y-Richtung geben die jeweiligen Abweichungen an. Die Abweichung des Bit-Wertes ist so gering, dass sie visuell im Diagramm nicht sichtbar ist (eigenes Diagramm).

Die 12 Bit AD-Wandlung liefert für maximale Ostneigung von -46° einen Wert von 1717 Bit und für maximale Westneigung von 46° einen Wert von 2339 Bit. Somit kann auf $0,15^\circ$ genau gewandelt werden:

$$\frac{92^\circ}{(2339-1717) \text{ bit}} \approx 0,15 \frac{^\circ}{\text{bit}} \quad (13)$$

Die Messunsicherheit des Neigungswinkels der y-Achse setzt sich aus dem Messfehler der kleinen Wasserwaage, die am Geodreieck befestigt wurde und der Messunsicherheit des Geodreiecks zusammen. Da die Wasserwaage auf ebenem Untergrund an das Geodreieck geklebt wurde, wird der Fehler des Klebevorgangs vernachlässigt. Der Messfehler der kleinen Wasserwaage wird mit circa $1,6 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ (Heinze 1953: 34), das heißt mit $0,1^\circ$ angenommen. Der Messfehler des Geodreiecks wird bei 2 LSD mit insgesamt 2° angenommen.

Eine nicht exakt vertikale Ausrichtung des Pfahls von RAGMAR, sollte vernachlässigbare Auswirkungen auf den Neigungswinkel haben, da mit Hilfe der Wasserwaage am Geodreieck der Tracker gegen die reale Horizontale, unabhängig von der Stationsausrichtung, kalibriert wurde.

Der Fehler, der aufgrund des verwendeten Algorithmus zur Sonnenstandsberechnung entsteht, liegt bei $\pm 0,0003^\circ$ (vgl. Reda/Andreas 2008) und kann in Relation zu den anderen Messunsicherheiten vernachlässigt werden.

Der zufällige Fehler, der durch die Kalibrierung entsteht, beträgt $1,1^\circ$ (vgl. Abbildung 16).

Wird ein Neigungswinkel gemessen und auf der SD-Karte gespeichert, dann ist dieser Neigungswinkel zu 4° genau angegeben:

$$0,15^\circ (\text{AD-Wandlung}) + 0,1^\circ (\text{kleine Wasserwaage}) + 2^\circ (\text{Geodreieck}) + 1,1^\circ (\text{zufälliger Fehler}) = 3,35^\circ \approx 4^\circ. \quad (14)$$

Wird die Frage gestellt, welche Messunsicherheit im Vergleich zur Neigungswinkelmessung der PVF X entsteht, müssen weitere Größen betrachtet werden:

RAGMAR aktualisiert alle 2 min seine Position. 2 min entsprechen nach Formel (12) einer Abweichung von $0,6^\circ$. Ein Kippvorgang des Trackers erfolgt in Form von Stufenregelung, das heißt ein Motorimpuls, durch die Zahnradübersetzung umgewandelt, bewirkt eine konstante Neigungswinkeländerung des Trackers. Genauer als diese Neigungswinkeländerung kann nicht getrackt werden. Wenn beispielsweise laut des Algorithmus ein Neigungswinkel von $5,151^\circ$ vorgegeben ist, und der Neigungssensor $5,150^\circ$ misst, würde der Tracker noch eine Stufe weiter tracken, sodass die vorgegebene Position überschritten wird. Eine Stufe RAGMAR's beträgt weniger als 1° , aber 1° wird vorsichtshalber angenommen, da genauer nicht mit dem Geodreieck gemessen werden kann.

Außerdem kann theoretisch ein Fehler dadurch entstehen, dass der Tracker aufgrund der Zahnradübersetzung innerhalb derselben Stufe Freiraum entgegen der Trackingrichtung aufweist: Wenn der Tracker nach Westen trackt und versucht wird, den Tracker per Hand nach Westen zu drehen, blockiert dieser, das heißt diese Richtung ist weitgehend fixiert. Wenn man allerdings den Tracker in die entgegengesetzte Richtung zu kippen versucht, ist dies leicht möglich und die Blockade erst nach einigen Grad Drehung zu spüren. Das liegt daran, dass die verwendeten Zahnräder einen gewissen Spielraum aufweisen. Dieser Fehler wird vernachlässigt, da normalerweise der Tracker immer in Haupttrackingrichtung dreht, in dessen Richtung dieser Fehler nicht gilt. Bewirkt ein Windstoß eine Drehung des Trackers entgegen der Trackingrichtung, würde sich der Tracker innerhalb von 2 Minuten automatisch wieder auf die richtige Position regeln und den Fehler ausgleichen. Außerdem wäre eine solche Bewegung des Trackers in den Messungen von RAGMAR's Neigungswinkel visuell sichtbar und kann aus der Auswertung herausgefiltert werden.

Auch der Fehler der Stufenregelung der PVF X ist bei einem Vergleich der Neigungswinkel mit zu berücksichtigen: Diese erfolgt alle 5 Minuten, was nach Formel (12) einer Abweichung von $1,4^\circ$ entspricht. Weitere Fehler bezüglich des Neigungswinkels der PVF X werden vernachlässigt, da keine Angaben über die verwendeten Neigungswinkelsensoren oder die Genauigkeit der astronomischen Steuerung vorliegen.

Bei einem Vergleich der Neigungswinkel RAGMAR's und der PVF X ergibt sich dabei für die erste Messperiode eine mögliche Gesamtabweichung von 7° :

$$\begin{aligned} &3,35^\circ \text{ (Neigungswinkelabweichung RAGMAR)} \\ &+ 1^\circ \text{ (Nachjustierungsabweichung Stufentracking RAGMAR)} \\ &+ 0,6^\circ \text{ (Zeitabweichung Stufentracking RAGMAR)} \\ &+ 0,05^\circ \text{ (Initialisierungszeit Echtzeituhr RAGMAR)} \\ &+ 1,4^\circ \text{ (Abweichungen zur PVF X aufgrund von Stufentracking)} = 6,4^\circ \approx 7^\circ. \end{aligned} \quad (15)$$

Der noch nicht berücksichtigte Initialisierungszeitfehler der 2. Messperiode liegt bei 6° , wodurch die Messunsicherheit der 2. Messperiode etwa doppelt so groß im Vergleich zur 1. ausfallen würde. Aus diesem Grund wird die 2. Messperiode aus der Ergebnisauswertung des Mehrertrags ausgeschlossen.

Für die Auswertung entscheidend ist vor allem die durch den Neigungswinkel verursachte, theoretisch mögliche Abweichung der Beleuchtungsstärke:

Zur Untersuchung der möglichen Abweichung bei direktem Licht wird mit Hilfe der Formel (4) die prozentuale, maximale Abweichung der Beleuchtungsstärke bei einer Messunsicherheit des Neigungssensors von 7° errechnet:

$$E_s = \frac{E_{gen}}{\cos(\theta_{gen})} \Leftrightarrow E_{gen} = E_s \cdot \cos(\theta_{gen}) \quad (16)$$

$$\left[1 - \frac{E_s \cdot \cos(\theta_{gen})}{E_s}\right] \cdot 100 = (1 - \cos(\theta_{gen})) \cdot 100 = (1 - \cos(7^\circ)) \cdot 100 \approx 0,8 \% \quad (17)$$

Zur Abschätzung der möglichen Abweichung bei diffusem Licht wird der isotrope Ansatz, visualisiert in Abbildung 8, verwendet. Es wird die prozentuale, maximale Abweichung der Beleuchtungsstärke von der Horizontalposition (E_{hor}) bei einer Neigungswinkeldifferenz von 7° errechnet:

$$E_{gen} = E_{hor} \cdot 0,5 \cdot [1 + \cos(\theta_{gen})] \quad (\text{Quaschnig 2019: 87}) \quad (18)$$

$$\left[1 - \frac{E_{hor} \cdot 0,5 \cdot [1 + \cos(\theta_{gen})]}{E_{hor}}\right] \cdot 100 = [1 - 0,5 \cdot [1 + \cos(7^\circ)]] \cdot 100 = 0,4 \% \quad (19)$$

Maximal würde die durch den Neigungswinkel verursachte Unsicherheit der Beleuchtungsstärke bei direktem Licht 0,8 % und bei diffusem Licht 0,4 % betragen. Der Einfluss der Neigungswinkelmessunsicherheit auf die Beleuchtungsstärke ist bei direktem Licht doppelt so groß wie bei diffusem Licht. Da das direkte Licht für die Auswertung weniger entscheidend ist, wird die Abweichung als akzeptabel eingestuft.

Das Accelerometer wurde vor Ort nicht erneut kalibriert, sondern nur der Neigungswinkel überprüft. Damit kann angenommen werden, dass das Accelerometer auf 4° genau messen kann. Dabei ist der Fehler durch das Bauteil Accelerometer recht unbedeutend, sondern die Ungenauigkeit kommt vor allem durch die Kalibriermaterialien Geodreieck und Wasserwaage zu Stande, die auch Einfluss auf die Messunsicherheiten des Stufentrackings und des zufälligen Fehlers ausüben. Bei einer Verwendung professionellerer Kalibriermaterialien hätte der Fehler erheblich reduziert werden können, allerdings waren diese Materialien nicht verfügbar.

Die Praxisverifikation der Messwerte in Anhang 13 belegt, dass der erwartete Fehler beim Vergleich der Neigungswinkelmesswerte der PVF X mit denen RAGMAR's sehr viel geringer als erwartet ausfällt: Durchschnittlich liegt die Abweichung bei circa 2° .

3.1.4 Messunsicherheit Beleuchtungsstärke und Kalibrierung

Die Umgebungslichtsensoren messen die Beleuchtungsstärke in Lux im Wellenlängenbereich 400 bis 700 nm (vgl. Anhang 14) mithilfe einer Photodiode (vgl. Ewald 2019). Auch wenn damit die Peak-Wellenlängen des Spektrums der Sonne von circa 300 bis > 2250 nm abgedeckt sind, werden insgesamt nur circa 50 % der Gesamtstrahlungsintensität der Sonne erfasst (vgl. Anhang 15). Die Pyranometer der PVF X, mit deren Messungen verglichen wird, erfassen hingegen das gesamte Spektrum der Sonne (vgl. Anhang 18). Ein weiterer Unterschied zum Sonnenspektrum ist, dass der Umgebungslichtsensor eine leichte Minderperformance um die 550 nm aufweist (vgl. Anhang 14).

Die Abweichung der von den Lichtsensormodulen gemessenen Beleuchtungsstärke aufgrund der AD-Wandlungsgenauigkeit beträgt im verwendeten „CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE“ (ROHM Semiconductor GmbH 2009: 5) 1 lx. Dieser Fehler kann vernachlässigt werden: RAGMAR startet seine Messungen ab einer Lichtschwelle von 1.000 lx, wodurch der verursachte Fehler 0,1 % betragen würde. Zur Mittagszeit können Beleuchtungsstärken von circa 50.000 lx auftreten, wodurch der verursachte Fehler dementsprechend noch weitaus geringer ausfällt.

Die Genauigkeit der unkalibrierten Messung ist typischerweise um den Faktor 1,2 größer als die reale Beleuchtungsstärke und variiert abhängig von der Produktion des Sensors im Bereich 0,96 bis 1,44

(ROHM Semiconductor GmbH 2009: 2). In der verwendeten Bibliothek zur Ansteuerung des Sensors wird der Output-Wert des Sensors um den typischen Faktor 1,2 korrigiert (vgl. Claws 2018). Die Beleuchtungsstärke kann auf Basis des systematischen Produktionsfehlers nur ungenau ermittelt werden.

Laut Datenblatt besteht auch eine Abhängigkeit zwischen Versorgungsspannungsänderung und Output-Signal, die vernachlässigt werden kann, da der Arduino Due laut eigenen Messungen eine ausreichend konstante Versorgungsspannung liefert. Es besteht eine geringe, lineare Abhängigkeit des Ausgangssignals von der Außentemperatur: steigt die Temperatur um 20 °C, dann erhöht sich das Output-Signal um circa 1,14 % (vgl. Anhang 16).

Die Umgebungslichtsensoren sind mit Silikon in die Trackerebene eingelassen und ein Ersatzsensor auch nachträglich auf die Trackerebene geklebt. Durch den Klebevorgang kann eine Abweichung der Sensorausrichtung zur Trackerebene entstehen. Auch eine nicht exakt vertikale Ausrichtung des Pfahls, mit dem RAGMAR im Boden verankert ist, kann eine Abweichung von der Trackerebene der PVF X bewirken. Für die kurze Wasserwaage, mit der der Stützpfehl RAGMAR's vermessen wurde, kann beispielsweise eine Abweichung von circa 0,7 mm/m angenommen werden (Heinze 1953: 34), was einer Abweichung von circa 0,05 ° entspricht.

Da RAGMAR nicht am gleichen Ort wie das Pyranometer 8 aufgestellt ist, sondern circa 50 m dazwischen liegen, kann auch das Einstrahlungsbild⁵ abweichen zum Beispiel wenn zufällig eine Wolke nur das Pyrometer der PVF X, aber nicht RAGMAR verschattet.

Die Azimutposition wurde visuell ermittelt, da RAGMAR in Nord/Süd-Richtung genau vor der dahinter liegenden Trackerreihe steht. Allerdings besteht im Azimut eine Abweichung von circa 5 ° zur Parkausrichtung, abhängig von der betrachteten Trackerreihe, da die Reihen untereinander auch nicht exakt gleich ausgerichtet sind. Die dadurch entstehende Ertragsabweichung beträgt bis zu 8 % und ist für einen Beispieltag in Anhang 17 dargestellt.

Auch wenn die erwarteten Fehler der Beleuchtungsstärke gravierend zu sein scheinen, können diese weitgehend durch eine Vor-Ort-Kalibrierung kompensiert werden. Die Methodik der Kalibrierung wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

Durch eine Vor-Ort-Kalibrierung können der systematische, produktionsbedingte Fehler und der Fehler in horizontaler und vertikaler Richtung, verursacht durch eine nicht exakt vertikale Ausrichtung des Stützpfehls RAGMAR's weitgehend kompensiert werden.

Der Fehler der Azimutabweichung, der einen großen Einfluss bei direktem Licht hat, wird rechnerisch ermittelt und kann zumindest stark minimiert werden.

Nur zum Teil kann der Fehler des Lichtspektrums kompensiert werden: Zwar werden durch die Kalibrierung die Messwerte des Gesamtspektrums denen des sichtbaren Spektrums des Umgebungslichtsensors gegenübergestellt, allerdings variiert die Intensität des Spektrums der Sonne in Abhängigkeit von der Tageszeit (Quaschnig 2019: 75), was nicht berücksichtigt wurde.

⁵ Als Einstrahlungsbild wird die gemessene Strahlung der Sonne des Pyranometers der PVF X in der Einheit Bestrahlungsstärke und die des Umgebungslichtsensors RAGMAR's in der Einheit Beleuchtungsstärke im Vergleich bezeichnet. Da es sich um verschiedene Einheiten handelt, wird Einstrahlung als Sammelbegriff für die ähnliche physikalische Größe bezeichnet, sofern keine Differenzierung möglich ist.

Der Fehler der Temperaturabhängigkeit des Umgebungslichtsensors wird durch die Kalibrierung nicht kompensiert, jedoch weist das Pyranometer der PVF X eine vergleichbare Temperaturabhängigkeit auf, weshalb eine rechnerische Korrektur bedingt möglich ist.

Nicht kompensiert werden können der vernachlässigbare Fehler von 1 lx Auflösung und der Fehler einer nicht konstanten Versorgungsspannung. Fehler der Ortsabweichung sind nicht kompensierbar, aber im Einstrahlungsbild visuell erkennbar und ggf. manuell herausfilterbar.

Wichtig für eine Kompensation der detektierten Fehler durch die Kalibrierung ist, dass diese wenn möglich konstant gehalten werden: Beispielsweise darf der Stützfahl RAGMAR's nicht mit der Zeit vom Wind zur Seite gekippt werden, weil dies Auswirkungen auf den Fehler der gemessenen Beleuchtungsstärke hätte. Um mit der Zeit entstehende Abweichungen, verursacht durch die Konstruktion, auszuschließen, wurde die vertikale Position durch 8 Abspannseile fixiert, befestigt mit mehrfach gegengekonterten Heringen pro Seil. Um Wackelkontaktfehler bei der Datenübertragung auszuschließen, wurden alle Verbindungsstellen verlötet, die gut zugänglich waren. Bei Anschlüssen in der Mitte des Arduino Due wurde dies vernachlässigt, weil Lötfehler dort die Platine zerstören könnten. Die Tatsache, dass einige Anschlüsse des Arduino Due nicht verlötet wurden, hat innerhalb der Testphase zu keinen Fehlern geführt, auch bedingt durch die I²C-Kommunikation.

3.2 Monitoringportal Y

Die PVF X wird über das Monitoringportal namens „Y.webportal“, kurz Yportal, fernüberwacht. Hier werden alle Messdaten der Anlage angezeigt und gespeichert. Alle Analysedaten dieser Arbeit von Komponenten der PVF X stammen aus diesem Portal und wurden in Form von Exceldateien daraus heruntergeladen. Für diese Arbeit betrifft dies Pyranometerdaten, Wechselrichtererträge, Trafoerträge und Trackerdaten. Das Performance Ratio (PR) wird aus einem Ertragsgutachten verwendet.

Die installierten Pyranometer der PVF X sind vom Typ SMP10 (vgl. Datenblatt Anhang 18). Die Fehlerbetrachtung ist weniger relevant, da die Fehler zum einen geringer sind, zum anderen die Umgebungslichtsensoren RAGMAR's nicht auf Realwerte, sondern direkt mit den Pyranometern der PVF X kalibriert wurden. Für die spätere Jahreshochrechnung der Ergebnisse werden die Bestrahlungsstärken aller ost/west-trackenden Pyranometer, das heißt Pyranometer 2, 4, 5, 8 und 12 und auch die des horizontalen Pyranometers 7 miteinbezogen. Für die Tagesauswertung der Messdaten wird nur das trackende Pyranometer 8 berücksichtigt: Zum einen die raw-Werte der Bestrahlungsstärke des Pyranometers, zum anderen auch die temperaturkompensierten Werte (vgl. Anhang 18). Aufgrund der großen Fläche der PVF, ergibt es Sinn, nur das Pyranometer als Vergleich zu wählen, das sich am nächsten an RAGMAR befindet, um eine zufällige Ertragsabweichung aufgrund unterschiedlicher Wolkenbilder zu minimieren (vgl. Anhang 19). Auch entstehen zwischen den Pyranometern zum Beispiel aufgrund von geringen Azimutabweichungen der Trackerreihen, Differenzen im Ertragsbild in Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke und Zeit (vgl. Anhang 19), was eine Auswertung erschweren würde.

Für die Umrechnung von Bestrahlungsstärkemehrerträgen in Energiemehrerträge der PVF X, muss zwischen diesen Größen eine funktionale Abhängigkeit ermittelt werden. Da die Trafostationen zum Teil mit sowohl trackenden als auch fixen Systemen ausgestattet sind, werden die Wechselrichtererträge als Umrechnungsgrundlage verwendet, an denen PV-Module auf Trackern angeschlossen sind. Trafoerträge werden verwendet, um den Systemverlust vom Wechselrichter zum Trafo zu ermitteln. In Abhängigkeit von der Temperatur verändert sich das PR des Parks. Für die Bestrahlungsstärken- und

Ertragsabhängigkeit wird dies auf Monatsbasis berücksichtigt. Diese Werte stammen allerdings nicht vom Yportal, da aufgrund von Trackerausfällen im Winter keine verwendbaren Messdaten verfügbar sind, sondern einem Ertragsgutachten. Ein Auszug der daraus verwendeten Werte ist in Anhang 20 dargestellt.

Trackerdaten werden unter anderem für die Berechnung der möglichen Energieeinsparung durch den neuen Algorithmus benötigt. Unter der Annahme, dass sich alle Tracker gleich verhalten, was durch die identische Programmierung theoretisch zutrifft, wird der funktionstüchtige Tracker Nummer 429 von Trafostation 8 als Referenz gewählt. In der Praxis ergeben sich jedoch Unterschiede im mechanischen Aufbau, wodurch Abweichungen entstehen (vgl. Anhang 21). Es handelt sich um einen Tracker von 78 m Länge, von denen am meisten im Park vorkommen. Die zur Auswertung verwendeten Daten sind der Neigungswinkel, die Akkuspannung, der Stromfluss vom Gleichspannungswandler des PV-Moduls zum Akku und der Stromfluss vom Akku zum Motor. Welche Sensoren diese Größen messen, ist unbekannt, ebenso mit welchem Fehler diese messen. Es wird nicht der Tracker des zugehörigen Pyranometers 8 verwendet, weil dieser auf einem Tracker der Länge 26 m angebracht ist, von denen am wenigsten im Park vorkommen. Damit hätte der Energieverbrauch nicht repräsentativ genug sein können. Die Übereinstimmung der Neigungswinkel des Trackers von Pyranometer 8 und des Trackers der Auswertung wird allerdings anhand des Yportals überprüft.

3.3 Simulationsprogramm Sonnenstand SPA

Der Sonnenpositionsalgorithmus „SPA“ (vgl. Reda/Andreas 2008) wird zur Bestimmung von Sonnenazimut und Elevation genutzt und nach Umwandlung in den Trackerneigungswinkel, beschrieben in Kapitel 2.3, für die astronomische Steuerung von RAGMAR verwendet.

Die INPUT-Daten des Algorithmus sind in Abbildung 17 zusammengefasst.

INPUT-Größe SPA	Inhalt
start date	01.05.2022
end date	31.09.2022
interval	2 min
latitude	
longitude	
timezone	2 h (UTC+2 für Sommerzeit)
elevation	31 m
annual average local pressure	1013 mbar
annual average local temperature	12 °C
Universal Time – Coordinated Universal Time	0 s (default)
Terrestrial Time – Universal Time	64,797 s (default)
Surface azimuth rotation	180° (default)
surface slope	0 °(default)
atmospheric refraction at sunrise and sunset	0,5667 ° (default)

Abbildung 17 Eingegebene Daten in den SPA Calculator. Relevant sind die Ortsangaben des Längen- und Breitengrads, die Zeitzone und das Intervall, das die Trackingfrequenz bestimmt (vgl. Reda/Andreas 2008).

Als Output wurde der „Topocentric zenith angle“ (vgl. Reda/Andreas 2008) in ° als Ersatz für die Elevation gewählt, der dem Winkel $\gamma_{s,neu}$ in Abbildung 11 entspricht und somit direkt für die Umrechnung in den Neigungswinkel des Trackers verwendet werden kann. Der “Topocentric azimuth angle (eastward from north)” (vgl. Reda/Andreas 2008) in ° entspricht dem Azimut α_s , definiert in Abbildung 4: Norden ist 0 ° und Osten 90 °. Zur Anwendung der Formeln von Abbildung 11 muss dieser mit Formel (5) in $\alpha_{s,neu}$ umgerechnet werden.

Die Plausibilität der Daten wurde anhand des Vergleichs mit den Trackerneigungswinkeln der PVF X überprüft: Es lässt sich eine geringe Abweichung von circa 2 ° erkennen (vgl. Anhang 13), was kleiner als die Messunsicherheit des Neigungswinkels RAGMAR’s ist. Deshalb kann der Algorithmus verwendet werden.

4 Entwicklung einer optimierten Trackersteuerung

4.1 Analyse des Trackerverhaltens der PVF X in Y

Um eine optimierte Steuerung entwickeln zu können, muss vorher die bereits vorhandene, astronomische Steuerung der PVF X genau analysiert werden. Die dabei relevanten Trackerdaten sind der Neigungswinkel, die Akkuspannung und die Stromflüsse zum Akku und zum Motor.

In Abbildung 18 ist der Neigungswinkel der Tracker der PVF X, gemessen gegen die Horizontale, anhand des Beispieltrackers Nummer 429 in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Die drei Funktionen gehören zum gleichen Tracker, gemessen an drei verschiedenen Tagen der ersten Messperiode.

Das Trackerverhalten lässt sich in 3 Phasen einteilen, die in Abbildung 18 farblich markiert sind:

Während der grün gefärbten Haupttrackingphase folgt der Tracker dem Stand der Sonne von Osten nach Westen: Er startet bei einer Maximalneigung von -46° Westneigung, die nicht überschritten wird und endet bei 46° Westneigung. Der Winkel zwischen den einfallenden Sonnenstrahlen und der Trackerebene wird nach den in Kapitel 2.3 ermittelten Positionen ausgerichtet, um den Ertrag zu maximieren. Der 0° Durchgang beschreibt den Sonnenhöchststand gegen 13:30 Uhr. An diesem Punkt ist der Tracker horizontal ausgerichtet.

Die gelben Phasen beschreiben den Backtrackingalgorithmus der PVF X: Gegen 19:00 Uhr bis Sonnenuntergang wird wieder auf die 0° Position zurückgetrackt, sodass eine Verschattung der Reihen untereinander verhindert wird. Nach dem gleichen Prinzip erfolgt das Backtracking am Morgen.

Die blaue Phase stellt das Nachtverhalten der PVF X dar. Alle Tracker werden vorsorglich in die sichere Sturmposition von 25° Westneigung gefahren. Dies ist theoretisch vermeidbar, da die Tracker Inputdaten der vor Ort gemessenen Windgeschwindigkeiten erhalten und bei einer Überschreitung der maximal tolerierbaren Tracking-Windgeschwindigkeit automatisch in die sichere Sturmposition von 25° Westneigung fahren. Die Neigung in der Nacht dient zudem der Minimierung von Modulverunreinigungen (Dolara et al. 2012: 526). Aber auch eine zu starke Modulverunreinigung könnte durch die bereits vorhandenen Sensoren der PVF X verhindert werden, die Modulverunreinigungen messen.

Am 05.06.2022 gegen 14:00 Uhr wurde eine grenzwertüberschreitende Windgeschwindigkeit gemessen, sodass der Tracker kurzzeitig in die sichere Sturmposition gefahren ist (vgl. graue Funktion von Abbildung 18).

Die anderen deutlich erkennbaren Abweichungen der Funktionen untereinander sind wahrscheinlich auf Steuerungsfehler zurückzuführen, wie um 04:48 Uhr die Abweichung der orangenen Funktion oder um 08:30 Uhr die Abweichung der blauen Funktion von den anderen. Bei der Abweichung aller Tracker von der Nachtposition gegen 01:30 Uhr, könnte es sich auch ein Programmier- oder Anzeigefehler handeln.

Generell ist für den kurzen Zeitraum der ersten Messperiode keine große Abhängigkeit der Funktionen vom Datum zu erkennen. Betrachtet man einen größeren Zeitraum, dann kann man feststellen, dass zur Sommersonnenwende die Haupttrackingphase die geringste Steigung aufweist: Dieser Tag ist der längste im Jahr (vgl. Abbildung 9), wodurch auch die Sonne über einen größten Zeitraum getrackt werden kann. Dementsprechend weist die Wintersonnenwende die größte Steigung auf.

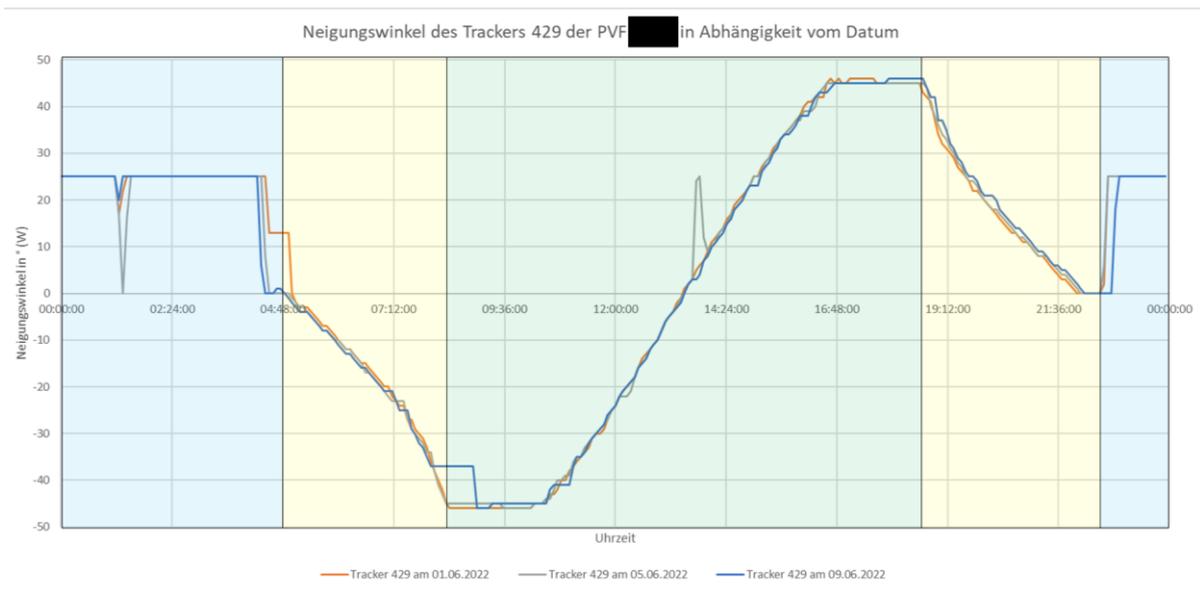


Abbildung 18 Neigungswinkel des Trackers 429 der PVF X in Abhängigkeit vom Datum. Die Darstellung des Neigungswinkels in ° Westneigung des Trackers Nummer 429 der PVF X erfolgt in Abhängigkeit von der Uhrzeit an 3 verschiedenen Tagen innerhalb der ersten Messperiode. Die orangene Funktion wurde am 01.06.2022 gemessen, die graue Funktion am 05.06.2022 und die blaue Funktion am 09.06.2022. Die Daten stammen vom Yportal.

Vergleicht man das Verhalten verschiedener Tracker am gleichen Tag untereinander, stellt man große Abweichungen fest (vgl. Anhang 21). Auch wenn die meisten Tracker prinzipiell funktionieren, erreichen einige nicht ihre Maximalposition, was wahrscheinlich auf mechanische Verformungen der Trackerachse zurückzuführen ist.

In Abbildung 19 sind die Stromflüsse vom 04.06.2022 vom Gleichspannungswandler des PV-Moduls zum Akku und vom Akku zum Motor des Beispieltrackers 429 in Abhängigkeit von der Uhrzeit auf der Primärachse dargestellt, auf der Sekundärachse der Neigungswinkel des Trackers. Die Akkuspannung ist nicht dargestellt. Diese weicht kaum von 24 V ab.

Gegen 04:30 Uhr fährt der Tracker mit Maximalgeschwindigkeit von Nachtposition auf 0°, dargestellt durch die gelbe Funktion. Der Stromfluss vom Akku zum Motor, durch die blaue Funktion ausgedrückt, beträgt während dieser Zeit 200 mA. Aufgrund der 5-Minuten-Mittelwertbildung erscheint der Stromverbrauch in der Backtracking- und Haupttrackingphase geringer als der vor Ort gemessene Stromfluss vom Akku zum Motor von 0,58 A. Die Zackenform des Stromflusses zum Motor während der Haupttrackingphase liegt am Stufentracking: Je nachdem, wie oft innerhalb der 5-Minuten-Mittelwertbildung getrackt wird, wird durchschnittlich verschieden viel Strom gemessen. Das Fahren des Trackers auf die Sturmposition gegen 22:30 Uhr verbraucht nur etwa halb so viel Strom wie das Fahren von der Sturmposition auf die 0° Position gegen 04:30 Uhr. Wahrscheinlich ist, dass ein Start aus der 0° Position aufgrund der Schwerkraftausnutzung der Modulreihe weniger Kraft benötigt als entgegen der Schwerkraft auf die 0° Position zu fahren. Die Kraft ist auf die gleiche Strecke bezogen proportional zum elektrischen Energieaufwand, gemessen in Form der Stromstärke, bei konstanter Zeit und Akkuspannung (vgl. Harten 2012: 43; 184). Ein 78 m Tracker der PVF X benötigt durchschnittlich eine Energie von $11,5 \frac{\text{Wh}}{\text{Tracker} \cdot \text{d}}$.

Der vom PV-Modul erzeugte Strom fließt über einen Spannungswandler zum Akku. Die graue Funktion beschreibt den Stromfluss vom Wandler zum Akku. Generell ist das Integral der grauen Funktion größer

als das der blauen Funktion, da nur ein Teil des Stroms zum Motor fließt. Der übrige Teil wird für die Versorgung der Elektronik und für Speicherverluste des Akkus aufgewendet. Die graue Funktion steigt bis 8 Uhr, da der Akku sich in der Nacht etwas entladen hat und die Bestrahlungsstärke ansteigt. Das bedeutet, dass der Stromfluss vom PV-Modul zum Akku zunimmt. Nach 8 Uhr sinkt der Stromfluss zum Akku, da dieser seinem maximalen Ladezustand nahe ist. Es wird trotz Stillstand des Trackers gegen 09:36 Uhr nicht 0 mA erreicht, da die Elektronik kontinuierlich Strom verbraucht.

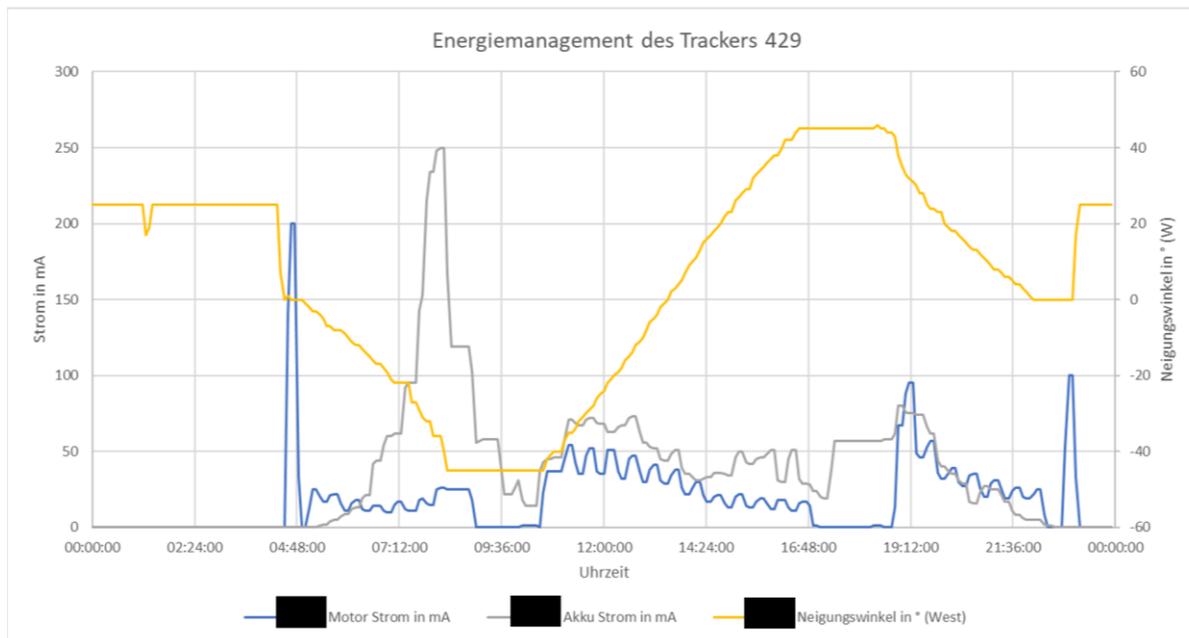


Abbildung 19 Energiemanagement des Trackers 429. Die Stromflüsse zum Akku und zum Trackingmotor sind in Abhängigkeit von der Uhrzeit auf der Primärachse und die Abhängigkeit des Neigungswinkels von der Uhrzeit auf der Sekundärachse für den 04.06.2022 dargestellt. Die Daten stammen vom Yportal.

4.2 Die Position des optimalen Diffuslichtertrags

In Kapitel 2.2.2 wurde bereits beschrieben, dass die Neigung in Richtung 0° Position bei Diffusstrahlung einen größeren Ertrag erbringt als das Tracken der unsichtbaren Sonne. Andere Modelle beziehen auch das Horizontleuchten oder die Helligkeitszunahme in Sonnennähe mit ein (Quaschnig 2019: 87), wodurch sich eine von der 0° Position abweichend optimale Position des Trackers bei Diffusstrahlung ergeben kann.

Um eine genauere Vorstellung der optimalen Neigungswinkel eines Trackers an einem bedeckten Tag zu erhalten, wurden mit Hilfe von RAMGAR's Sensorsteuerung näherungsweise optimale Neigungswinkel im Tagesverlauf aufgezeichnet (vgl. Abbildung 20).

Diese funktioniert nach dem Prinzip, das in Anhang 4, Bild b) dargestellt ist. Es werden die Beleuchtungsstärken der beiden Umgebungslichtsensoren verglichen, die jeweils um 45° von der Trackingebene angewinkelt angebracht sind: Der Ostsensor ist um 45° nach Osten geneigt und der Westsensor um 45° nach Westen (vgl. Anhang 10). Der Tracker richtet sich mit schneller Trackinggeschwindigkeit zur detektierten, größten Beleuchtungsstärke aus und zeichnet dabei den Neigungswinkel auf. Dadurch kann näherungsweise die Trackerposition des optimalen Diffuslichtertrags an einem bedeckten Tag erfasst werden (vgl. Abbildung 20). Diese kann nur näherungsweise bestimmt werden, da RAGMAR sich nach der hellsten, gemessenen Stelle im Himmel

ausrichtet, die aber nicht unbedingt auch die insgesamt hellste Stelle im Himmel sein muss (vgl. Anhang 6). Außerdem wurden die Umgebungslichtsensoren bei Direktstrahlung aufeinander kalibriert, wodurch sich Abweichungen bei Diffusstrahlung ergeben könnten.

Parallel zu RAMGAR's Messungen wurde ein Zeitraffer aufgenommen (vgl. Anhang 22), um das Wolkenbild einschätzen zu können. Der Zeitraum des vollständig bedeckten Himmels dauerte am 26.03.2022 von etwa 10 Uhr bis 14:30 Uhr. Die Stelle des optimalen Ertrags variiert ununterbrochen während des vollständig bedeckten Himmels ohne Direktstrahlung um die 0° Position (vgl. Abbildung 20). Gegen Morgen tendiert die Mehrertragsposition um bis zu 9° Richtung Osten, gegen Nachmittag um bis zu 14° nach Westen. Dabei entscheidet das Wolkenbild darüber, welcher Neigungswinkel am sinnvollsten ist: Kommen hellere Stellen in der Wolkenschicht vor, dreht der Tracker zufällig in deren Richtung, was in Abbildung 20 die gezackten Verläufe um die Mittagszeit erklärt. Je dichter die Wolkenschicht ist, desto geringer ist der Direktstrahlungsanteil, desto näher liegt der optimale Ertrag an der 0° Position. Ab 14:30 Uhr ist der bedeckte Himmel etwas aufgeklart, sodass die optimale Position in Richtung Sonne tendiert. Sobald die Wolkenschicht wieder zunimmt, tendiert die optimale Ertragsposition Richtung 0° .

Eine Sensorsteuerung kann bei Diffusstrahlung trotzdem nachteilig sein, denn Störgrößen wie Reflexionen können die Sensoren beeinflussen (Pineda/Arredondo 2012: 2905) oder durch Verschmutzungen der Sensoren wird deren Genauigkeit eingeschränkt. Zudem benötigt ein sensorgesteuertes System in der Regel größere Investitionskosten als eine astronomische Steuerung (Fuentes-Morales et al. 2020: 209).

Entscheidend dafür, dass die Sensorsteuerung auf der PVF X nicht angewendet werden soll ist, dass der Trackingenergieaufwand zu groß ist. Dieser ist abhängig von der Trackinggeschwindigkeit und dem Grenzwert, nach dessen Überschreitung nachgeführt wird. In Abbildung 20 wird ab einem Grenzwert von 1 % Abweichung zwischen den Beleuchtungsstärken von West- und Ostsensor nachgeregelt. Dies bewirkt, dass der Tracker eigentlich ständig am nachführen ist. Eine ständig nachführende Sensorsteuerung würde bei einem gemessenen Stromfluss zum Motor der PVF X von 0,58 A und einem Trackingenergieaufwand der astronomischen Steuerung von $11,5 \frac{Wh}{\text{Tracker} \cdot d}$ bei einer angenommenen Trackingdauer von $12 \frac{h}{d}$ bis zu 15mal so viel Trackingenergie benötigen wie eine astronomische Steuerung:

$$\frac{0,58 \text{ A} \cdot 24 \text{ V} \cdot 12 \frac{h}{d}}{11,5 \frac{Wh}{d}} \approx 15 \quad (20)$$

Auch wenn durch passende Grenzwertwahl der Energieaufwand erheblich reduziert werden kann, ist bei einem Stand-Alone-System, das mit der astronomischen Steuerung schon Probleme der Trackingenergieversorgung im Winter hat, eine Sensorsteuerung nicht anwendbar.

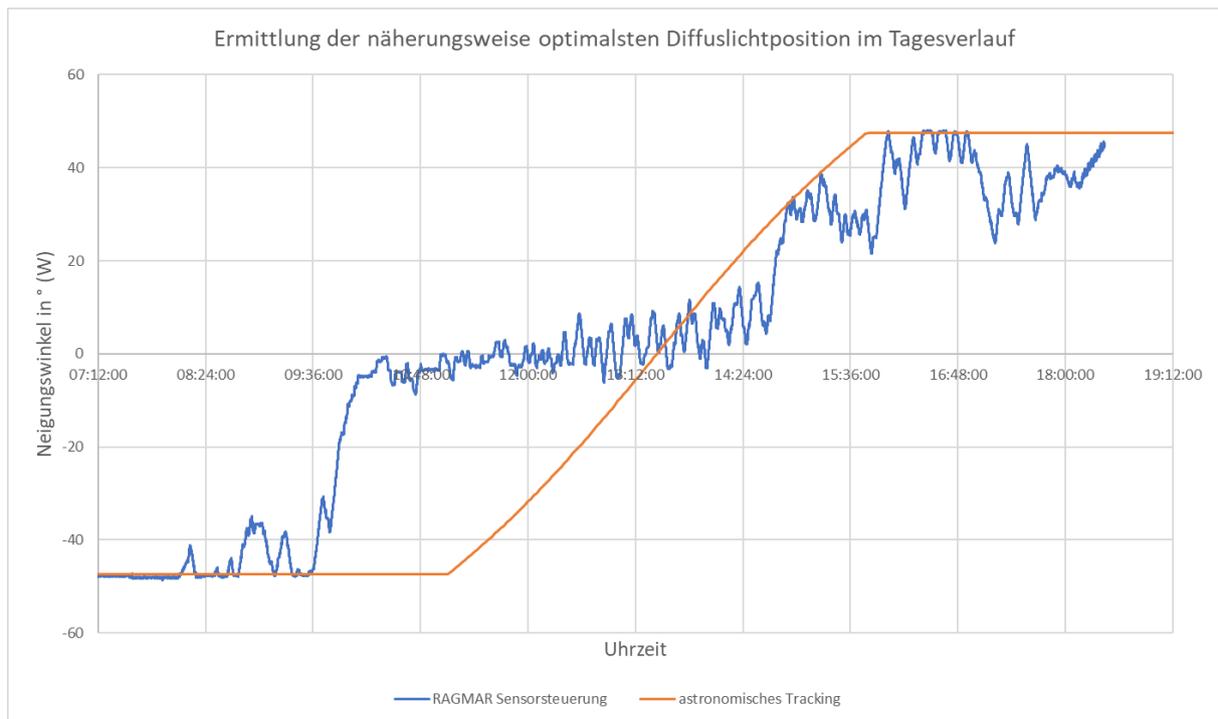


Abbildung 20 Ermittlung der näherungsweise optimalen Diffuslichtposition im Tagesverlauf. Es wurde mit Hilfe von RAGMAR's Sensorsteuerung am 26.03.2022 in Uetersen gemessen. Der Neigungswinkel in ° Westneigung ist in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Die blaue Funktion ist RAGMAR's Sensorsteuerung zuzuordnen und die orangene Funktion zeigt den theoretischen, astronomischen Trackingverlauf am gleichen Tag (eigene Messung).

An einem vereinzelt bewölkten Tag (vgl. Anhang 23) ist zu sehen, dass der optimale Neigungswinkel in Richtung 0° tendiert, sobald RAGMAR durch Wolken verschattet wird, sich allerdings wieder dem astronomischen Verlauf annähert, sobald Direktstrahlung erfasst wird. In Abhängigkeit von der Verschattungsdauer und der Stärke der Verschattung durch eine Wolke kann es Sinn ergeben, vom astronomischen Tracking abzuweichen.

Auch wenn eine Sensorsteuerung bei Diffusstrahlung nicht sinnvoll ist, können trotzdem Sensoren für eine optimierte Steuerung verwendet werden: Durch diese kann ein Grenzwert der Beleuchtungsstärke ermittelt werden, ab dem sich Tracking lohnt, beziehungsweise nach dessen Unterschreitung eine vom astronomischen Tracking abweichende Position eingestellt werden kann (Kelly/Gibson 2009: 2101). Diese Position sollte sich für bedeckte Tage in der Nähe der 0° Position befinden, die in Abbildung 20 den optimalen Ertrag zu ergeben scheint. Das deckt sich mit den Erkenntnissen aus Abbildung 8. Allerdings ist auch an bedeckten Tagen im Mittel eine Steigung des Neigungswinkels von 10:00 Uhr bis 14:30 Uhr erkennbar (vgl. Abbildung 20), was in Abhängigkeit von der Stärke der Bewölkung mit einer Helligkeitszunahme in der Nähe der Sonne begründet werden kann.

Der Grenzwert ist abhängig von Datum, Uhrzeit und Standort (vgl. Anhang 7) und soll für die PVF X ermittelt werden.

Dazu können die Pyranometerdaten der PVF X verwendet werden: Tracking ist immer dann kontraproduktiv, wenn das 0° Pyranometer eine größere Bestrahlungsstärke misst als ein trackendes Pyranometer. Für beispielsweise 1 h Intervalle ähnlich wie in Anhang 7 können Ausgleichsfunktionen ermittelt werden, die für jede Stunde den Grenzwert in Abhängigkeit vom Datum darstellen. Zum Zeitpunkt der Vollendung dieser Arbeit lagen allerdings noch keine ganzjährigen Messungen der

Pyranometer vor. Eine uhrzeit- und datumabhängige Ermittlung des Grenzwertes sollte dann bei einer Praxisumsetzung erfolgen. Alternativ wäre es aber auch möglich, den Grenzwert analytisch zu bestimmen (vgl. Kelly/Gibson 2009).

Mit RAGMAR wurde ein solcher Grenzwert näherungsweise in Form einer Konstanten ermittelt (vgl. Abbildung 21), um die entwickelte Trackersteuerung testen zu können. Die Abhängigkeit vom Datum kann bei diesem Test vernachlässigt werden, da die Daten weniger als einen Monat vor dem Praxistest aufgenommen wurden. Um die Abhängigkeit von der Uhrzeit zu berücksichtigen, wurde der Grenzwert des Trackings nur bei Trackerneigungswinkeln $> 25^\circ$ Ost- beziehungsweise Westneigung erfasst. Für eine vollständige, uhrzeitabhängige Berücksichtigung wären weitaus mehr Daten notwendig gewesen.

Der Durchschnittswert der Messungen liegt bei 16.017 lx. Minimal wurden 11.491 lx und maximal 22.241 lx festgestellt. Die Standardabweichung der Einzelmessung ist mit 20 % vom Durchschnittswert sehr groß. Das liegt aber nicht an der Ungenauigkeit der Messungen, da Messfehler der Umgebungslichtsensoren bei einer Kalibrierung aufeinander ohne den Vergleich zur PVF X zu vernachlässigen sind (vgl. Kapitel 3.1.4). Ein Grund für die Abweichung, ist die überwiegende Vernachlässigung der Tageszeitabhängigkeit des Grenzwertes. Aber selbst unter Berücksichtigung der Tageszeit können hohe Grenzwertabweichungen von um die 20 % im Sommer auftreten (vgl. Anhang 7). Es gibt somit keinen exakten Grenzwert. Nach Umrechnung in eine Bestrahlungsstärke mit der Ausgleichsfunktion von Anhang 29, ergibt sich der Durchschnittsgrenzwert zu $289 \frac{W}{m^2}$.

Zu Validierung des festgelegten Grenzwertes wurde die Studie von Quesada et al. (2015) herangezogen. In Montreal wurden stündliche Mittelwerte der Bestrahlung aus Juni, Juli und August simuliert, wodurch sich im vergleichbaren Zeitraum von 08:00 Uhr bis 10:00 Uhr und von 14:00 Uhr bis 16:00 Uhr ein mittlerer Grenzwert der Bestrahlung von circa $405 \frac{Wh}{m^2}$ ergeben würde (vgl. Anhang 7). Obwohl die Einheiten verschieden sind, ist ein Vergleich mit dem Grenzwert aus Abbildung 21 trotzdem bedingt möglich, da der stündliche Mittelwert der Bestrahlung \bar{H} das gleiche ausdrückt wie der stündliche Mittelwert der Bestrahlungsstärke \bar{E} :

$$\frac{\bar{H}}{1 \text{ h}} = \bar{E} \quad (21)$$

Die Größenordnung des ermittelten Grenzwertes aus Abbildung 21 stimmt mit der Literatur überein. Ein Vergleich ist deswegen nur bedingt möglich, da Montreal auf einem geringeren Breitengrad liegt, der Grenzwert im Sommer größer ist als im Mai und sich die Einheit beziehungsweise die Vorgehensweise der Grenzwertermittlung unterscheidet.

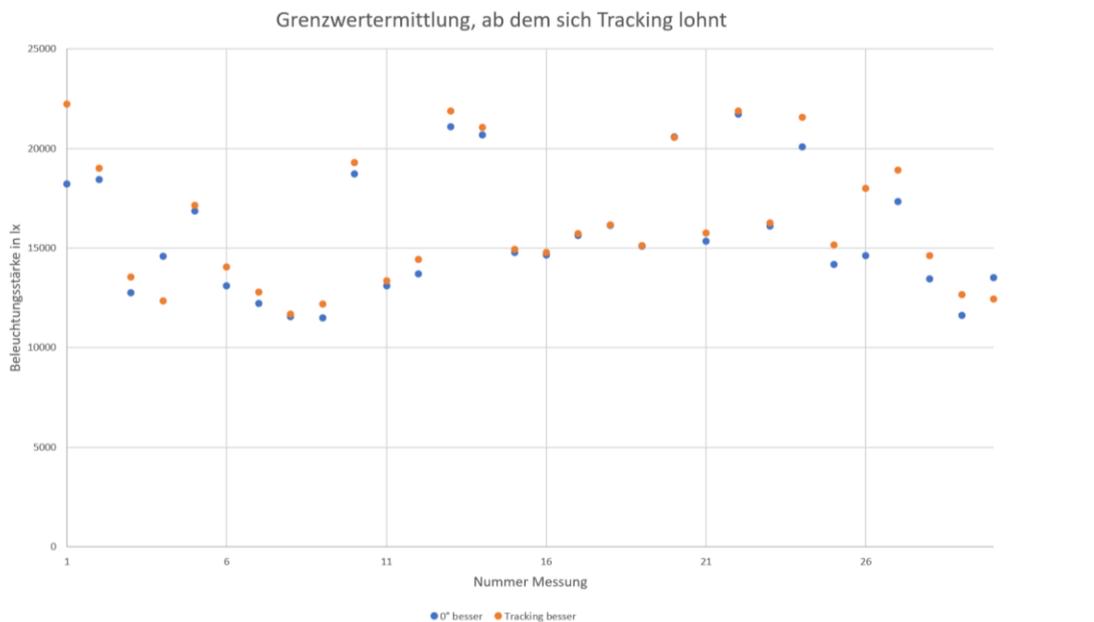


Abbildung 21 Grenzwertermittlung, ab dem sich Tracking lohnt. Die gemessene Beleuchtungsstärke ist in Form eines Mittelwerts zwischen 0° und Nord-Sensor auf der y-Achse für die 30 Messungen auf der x-Achse dargestellt. Diese Messpunkte beschreiben den Schnittpunkt der roten und schwarzen Funktion von Anhang 23. Der Schnittpunkt ist in Form des orangenen und blauen Punktes bei 2 aufeinanderfolgenden Messungen dargestellt: Beim orangenen Punkt hat der Nord-Sensor den größeren Ertrag erzielt. Beim blauen Punkt der 0° Sensor. Wenn die blauen und orangenen Messpunkte zu stark voneinander abweichen, liegt dies an sich stark veränderten Lichtverhältnissen innerhalb 2 aufeinanderfolgender Messungen. Größere Abweichungen wurden deshalb im Vorfeld herausgefiltert. Die Messungen sind Mitte Mai aufgenommen worden (eigene Messungen).

4.3 Optimierter Steuerungsalgorithmus vct

Da das Stand-Alone-Trackingsystem der PVF X im vergangenen Winter tiefenentladen war, gilt die Zusatzanforderung, dass in keinem Fall mehr Trackingenergie aufgewendet werden darf als das bisherige, astronomische System benötigt.

Der optimierte Algorithmus namens⁶ „if_visible_control_tracking()“, kurz vct, arbeitet auf Basis einer Deaktivierung und Reaktivierung der astronomischen Steuerung in Abhängigkeit eines Bestrahlungsstärkengrenzwertes. Dabei soll die auf die PVF X anzuwendende vct-Steuerung niemals einen größeren Neigungswinkel verursachen als die astronomische Steuerung zum gleichen Zeitpunkt. Das Grundprinzip der Steuerung wurde bereits für einen zweiachsigen Tracker von Rubio et al. (2007: 2178; 2179) angewendet, auch wenn das damalige Ziel keine Optimierung des Diffuslichtverhaltens war.

Dieser Algorithmus wird auch in vereinfachter Form mit RAGMAR getestet: Die Backtrackingphase der PVF X wird vernachlässigt sowie die Uhrzeit- und Datumabhängigkeit des Grenzwertes. Als Grenzwert der Beleuchtungsstärke wird auf die Ergebnisse von Abbildung 21 zurückgegriffen. Der Grenzwert wird mit 15.000 lx aufgrund der starken Grenzwertschwankungen vorsichtshalber minimal

⁶ Der Name ist ausgedacht.

niedriger als der Mittelwert der Messungen angesetzt. Dadurch soll erreicht werden, dass die Trackingposition in weniger Fällen trotz Grenzwertunterschreitung eine größere Beleuchtungsstärke misst als die 0 ° Position. Der Median der Messungen von Abbildung 21 liegt auch beispielsweise nur bei 15.140 lx, sodass 16.107 lx aufgrund geringer Datenmengen vermutlich zu hoch ermittelt sind. 15.000 lx entsprechen $269 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ nach Umrechnung mit der Ausgleichsfunktion von Anhang 29.

Allgemein gilt, dass das Tracking immer dann deaktiviert wird, wenn der Grenzwert unterschritten ist und sich der Tracker von der 0 ° Position wegbewegt.

Ein möglicher Tagesablauf der vct-Steuerung RAGMAR's ist am Beispiel des 02.06.2022 im Vergleich zur astronomischen Steuerung der PVF X in Abbildung 22 dargestellt: Der Tracker fährt nachts auf die 0 ° Position. Wird bis zur Zeit des Sonnenhöchststands der Grenzwert nicht überschritten, dann bleibt der Tracker auf 0 ° stehen. Wird der Grenzwert wie in Abbildung 22 um 10:40 Uhr überschritten, dann tracket der Tracker ab dem Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung zu der Position, die nach astronomischer Steuerung der optimalen Ausrichtung des Trackers zur Sonne entspricht. In Abbildung 22 wäre das bis zur orangenen Funktion, da die PVF X astronomisch gesteuert ist. Anschließend folgt RAGMAR's Algorithmus der astronomischen Steuerung bis zum Sonnenhöchststand unabhängig von der gemessenen Beleuchtungsstärke. Theoretisch wäre es bei einer erneuten Grenzwertunterschreitung sinnvoller, wieder direkt auf die 0 ° Position zurück zu tracken. Wenn aber nun ein zweites Mal innerhalb dieses Zeitraums der Grenzwert überschritten werden würde, dann hätte der Tracker in Summe mehr getrackt als die astronomische Steuerung und damit auch mehr Trackingenergie verbraucht. Dies soll aber verhindert werden. Nach dem Sonnenhöchststand bis zum Ende des Tages trackt RAGMAR wieder beleuchtungsstärkenabhängig. In Abbildung 22 lag nach Erreichen des Sonnenhöchststands eine Grenzwertunterschreitung vor, weshalb der Tracker auf der 0 ° Position geblieben ist. Eine kurzzeitige Überschreitung des Grenzwertes gegen 14:24 Uhr bewirkt, dass RAGMAR auf die zugehörige Position der astronomischen Steuerung fährt, sodass sich die blaue und orangene Funktion berühren. Bis zum Abend folgt eine Grenzwertunterschreitung, sodass RAGMAR nicht weiter dem Algorithmus folgt. Auch hier wäre ein Tracken auf 0 ° theoretisch sinnvoller, wird aber aufgrund des möglichen Mehrenergieaufwands nicht durchgeführt. Nach Unterschreitung von 1.000 lx wird der Nachtmodus aktiviert, in dem RAGMAR um 20:30 Uhr wieder auf die 0 ° Position zurückfährt, wo die Station bis zur Grenzwertüberschreitung des nächsten Tages verweilt.

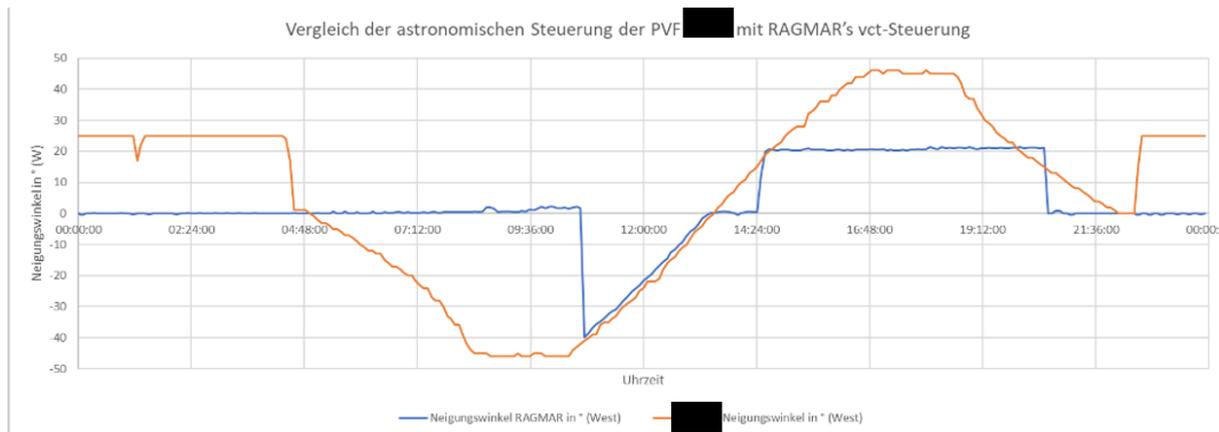


Abbildung 22 Vergleich der astronomischen Steuerung der PVF X mit RAGMAR's vct-Steuerung. Die Messung wurde am 02.06.2022 an einem bewölkten Tag durchgeführt. Der Neigungswinkel in ° Westneigung ist in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Der Neigungswinkel der PVF X ist am Beispiel des Trackers 429 der orangenen Funktion zuzuordnen. RAGMAR's Neigungswinkel wird durch die blaue Funktion beschrieben (eigenes Diagramm).

Da bei einer späteren Anwendung der vct-Steuerung auf die PVF X das Backtracking mitberücksichtigt werden muss, müsste in Abbildung 22 der korrigierte Verlauf der blauen Funktion um 20:00 Uhr mit dem Backtracking der PVF X wieder zur 0 ° Position mitfahren, da ansonsten die vct-Steuerung kurzzeitig einen größeren Neigungswinkel verursachen würde als die astronomische Steuerung. Visuell dürfen sich die blaue und orangene Funktion während der Haupt- und Backtrackingphase, mit Ausnahme des 0 ° Durchlaufs zur Mittagszeit, niemals schneiden. Wird morgens zwischen 04:48 Uhr und 08:35 Uhr der Grenzwert überschritten, soll die blaue Funktion nicht direkt auf -46 ° drehen, sondern nur zur Position des Backtrackings der PVF X fahren und dem Backtrackingalgorithmus bis zu -46 ° folgen, sofern der Grenzwert innerhalb dieser Zeit auch weiterhin überschritten wird.

Ein vereinfachter Programmablaufplan der vct-Steuerung RAGMAR's ist in Abbildung 23 dargestellt. Dieser reduziert die Komplexität von RAGMAR's Programmcode auf ein vernünftiges Maß. So sind unter anderem interne Funktionsverknüpfungen nicht im Detail dargestellt. Ein Programmablaufplan bei einer Umsetzung der vct-Steuerung auf die PVF X, unter anderem mit berücksichtigtem Backtracking und eines uhrzeit- und datumvariablen Grenzwerts, ist in Anhang 24 dargestellt. Bei einer Praxisumsetzung müssen auch Pyranometerausfälle, die Gewährleistung des Modulreinigungseffekts und Schneelastüberlegungen Berücksichtigung finden, ebenfalls dargestellt in Anhang 24.

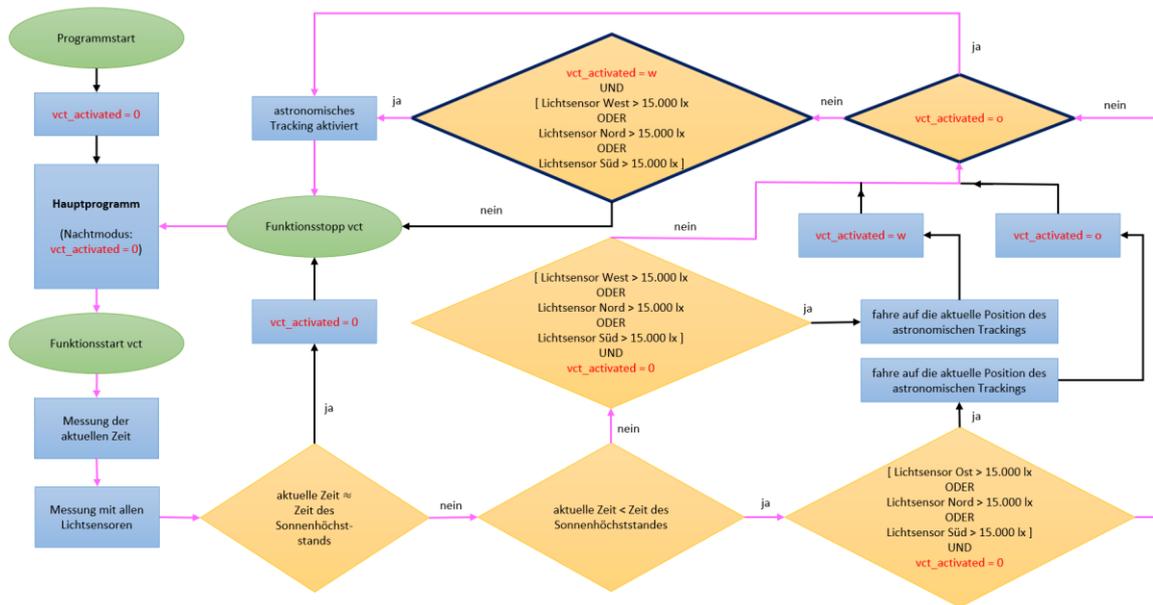


Abbildung 23 Darstellung der vct-Steuerung als Programmablaufplan. Als Steuervariable dient „vct_activated“, die die Zustände 0, w und o annehmen kann. Nach Programmstart (links oben) wird diese mit „0“ initialisiert, was bedeutet, dass kein Tracking stattfindet. Auch in der Nacht wird diese Variable vom Hauptprogramm wieder auf 0 gesetzt oder wenn sich die Sonne genau über dem Tracker befindet. In diesen Fällen steht der Tracker immer auf der 0 ° Position. Um zu tracken, muss die Steuervariable den Wert „o“ annehmen, wenn die Sonne im Osten steht oder „w“, wenn sie im Westen steht. Dies wird durch die gelben Blöcke unten rechts und dem zentralen Block herausgefunden. Ist ein w oder o gesetzt, bleibt es für den Rest der Tageshälfte unverändert. Die direkte Regelung der astronomischen Steuerungsaktivierung oder -deaktivierung übernehmen die schwarz umrandeten Blöcke oben rechts: Ist ein „o“ gesetzt, wird die Tageshälfte über astronomisch getrackt. Ist ein „w“ gesetzt wird die Tageshälfte astronomisch getrackt, unter der Bedingung, dass noch immer der Beleuchtungsstärkengrenzwert überschritten ist. Der schleifenartige Standardprogrammdurchlauf während des aktivierten astronomischen Trackings ist mit rosa Pfeilen gekennzeichnet (eigener Programmablaufplan).

Die vct-Steuerung ist stark an die Bedingung geknüpft, auf keinen Fall einen Mehrenergieaufwand des Trackings zuzulassen. Aus diesem Grund kann das Forschungspotential der Literatur nicht voll ausgeschöpft werden: Es handelt sich nicht um die Steuerung des besten Diffuslichtverhaltens, sondern nur um die Steuerung eines optimierten Diffuslichtverhaltens. Die theoretisch optimale Position bei Diffusstrahlung liegt nahe 0 °. Durch eine Trackingunterbrechung wird nur ein größerer Minderertrag verhindert, aber es könnte durch Tracken zur 0 ° Position auch ein noch größerer Mehrertrag erzielt werden.

Dass die optimale Trackingposition wegen der Helligkeitszunahme im Bereich der Sonne von der 0 ° Position im Tagesverlauf abweicht (vgl. Abbildung 20), ist in der vct-Steuerung teilweise berücksichtigt. An einem stark bewölkten Tag mit weniger Helligkeitszunahme im Bereich der Sonne, bleibt der Tracker auf 0 ° stehen. An einem weniger stark bewölkten Tag mit mehr Helligkeitszunahme im Bereich der Sonne, werden kurzzeitige Überschreitungen des Grenzwertes wahrscheinlicher, weshalb die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Tracker in einer Richtung Sonne geneigten Position zum Stillstand kommt.

Diese Steuerung ist eine der Steuerungen, die am sparsamsten mit der für das Tracking nötigen Energie umgeht. Damit minimiert sie wirksam das Risiko einer Tiefentladung, das in der PVF X mit ihrer astronomischen Steuerung im Winter bereits eintrat. Auch die Erzielung eines Mehrertrags ist auf lange Sicht garantiert. Es stellt sich nun die Frage, wie viel mehr Trackingenergie eingespart und Mehrertrag durch die optimierte Modulstellung erbracht werden kann, was in Kapitel 5 untersucht wird.

Die Steuerung basiert zudem auf Ist- und keinen Prognosewerten. Mit Hilfe von Prognosewerten könnte möglicherweise abgeschätzt werden, ob bei Abbildung 22 nach 14:24 Uhr noch Direktstrahlung zu erwarten ist oder auf das Tracken trotz Grenzwertüberschreitung auch verzichtet werden könnte. Auch das Stand-Alone-System bietet unter Berücksichtigung von Prognosedaten weitere Optimierungschancen: Wird am nächsten Tag viel Direktstrahlung erwartet und sind die Akkus aufgeladen, kann am aktuellen Tag auch eine energieintensivere Steuerungsmethode gewählt werden. Besser als das Tracking auf 0° nach Grenzwertunterschreitung wäre zum Beispiel langsames, sensorgesteuertes Tracking oder noch besser das Tracking durch einen Live-Himmelsscan zur Suche der hellsten Stelle im Wolkenhimmel (vgl. Pineda/Arredondo 2012). Da alle Tracker im Park durch ein Kommunikationsnetzwerk verbunden sind, ist es auch nicht nötig, jeden einzelnen Tracker mit Sensoren auszustatten, nur eine Ausfallsicherheit sollte gewährleistet sein. Der Nachteil an Prognosedaten ist, dass in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Prognose, das Irrtumsrisiko steigt.

5 Auswertungen des Praxistests in X

5.1 Tagesauswertung der Messergebnisse RAGMAR's

Mit Hilfe von RAGMAR sollen in Form eines Praxistest die Größen „Tracker-Energieeinsparung“ und „Mehrertrag“ gegenüber der aktuellen Steuerung quantitativ eingeschätzt werden. In diesem Abschnitt wird anhand von Beispieltagen erläutert, wie die Messergebnisse RAGMAR's mit denen der PVF X verglichen werden. Dazu werden Korrekturrechnungen zur Minimierung der Messfehler von Kapitel 3.1 durchgeführt. Es ist beim Mehrertrag besonders auf den prozentualen Bezug zu achten, der beispielsweise mit Tagesbezug ein anderer ist als mit Jahresbezug.

Die Daten der PVF X liegen im 5-Minuten-Format vor – RAGMAR misst außerhalb des Nachtmodus, der bei Beleuchtungsstärken $< 1.000 \text{ lx}$ aktiviert ist, mehrmals pro Minute. Zur Vereinheitlichung der Zeitbasis werden RAGMAR's Messdaten durch Mittelwertbildung in ein 5-Minuten-Format umgewandelt.

An Tagen, an denen Direktstrahlung überwiegt wie zum Beispiel am 04.06.2022 in X (vgl. Anhang 17), zeigen sich während der Haupttrackingphase deutliche, zeitabhängige Abweichungen von RAGMAR's Messwerten im Vergleich zur PVF X. Das liegt daran, dass sich RAGMAR's Azimutausrichtung um circa 5° von der PVF X unterscheidet, was durch einen Kompass ermittelt wurde. RAGMAR befindet sich näher an der Ost/West-Ausrichtung als die PVF X. Die Azimutabweichung kommt zu Stande, da eine Feinjustierung des Rammpfahls vor Ort nicht genauer möglich war.

Diese Azimutabweichung soll rechnerisch korrigiert werden. Dazu müssen RAGMAR's Messwerte kalibriert vorliegen. Die Kalibrierung soll mit den Messwerten der PVF X durchgeführt werden. Die Messwerte der PVF X sind aber aufgrund der Azimutdifferenz zu RAGMAR fehlerbehaftet. Somit bedingen sich die Ausgleichsfunktion der Azimutabweichung und die der Kalibrierung gegenseitig und können nicht fehlerfrei voneinander ermittelt werden.

Es wurde entschieden, mit Messwerten mehrerer Tage eine Vorkalibrierung durchzuführen unter der Bedingung, dass RAGMAR und die PVF X den gleichen Neigungswinkel eingestellt haben (vgl. Anhang 25). Aufgrund der Azimutabweichung streuen die Messwerte der Vorkalibrierung bei großen Bestrahlungsstärken stark (vgl. Anhang 25).

Dabei werden die nicht temperaturkorrigierten Pyranometermesswerte verwendet, um den Fehler der Temperaturabhängigkeit der Umgebungslichtsensoren zu minimieren. Das ist deshalb möglich, da sich der verwendete Faktor für die Temperaturkorrektur der Pyranometer (vgl. Anhang 26) und der Faktor der Temperaturabhängigkeit der Umgebungslichtsensoren (vgl. Anhang 16) ähneln. Dabei ist der Referenzpunkt beider Temperaturabhängigkeiten mit circa 20 °C anzunehmen, allerdings steigt die Temperaturkompensation der PVF X um $0,12 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$ und die der Umgebungslichtsensoren um $0,057 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$, weshalb eine Kalibrierung auf die raw-Bestrahlungsstärken nur einen Teil des Temperaturfehlers der Umgebungslichtsensoren behebt.

Die Azimutkorrektur wird für die Zeit der Direktstrahlung und gleicher Neigungswinkel am 04.06.2022 von 09:50 Uhr bis 19:12 Uhr durchgeführt. Dazu werden mit Hilfe der Vorkalibrierungsfunktion von Anhang 25 die Beleuchtungsstärken RAGMAR's von Nord- und Südsensor in Bestrahlungsstärken umgerechnet, sodass die Messwerte der PVF X und die RAGMAR's die gleiche Einheit der Bestrahlungsstärke haben und damit vergleichbar sind.

Es werden 3 Ausgleichsfunktionen gebildet, die die Messwerte der PVF X, des Nordensors und des Südsensors beschreiben (vgl. Anhang 27). Durch Division der Ausgleichsfunktionen des Nord- und Südsensors durch die Ausgleichsfunktion der PVF X ergibt sich je eine zeitabhängige Ausgleichsfunktion für den Nord- und Südsensor zur Azimutkorrektur (vgl. Anhang 28).

Die Azimutkorrektur wird nur bei Direktstrahlung angewendet: In Anhang 17 erkennt man, dass vor 09:36 Uhr bei Diffusstrahlung die Abweichung der Umgebungslichtsensorwerte von dem Pyranometer sehr viel geringer ausfällt als bei Direktstrahlung nach 09:36 Uhr. Als Grenzwert für die Anwendung der Azimutkorrektur werden $600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ festgelegt, da innerhalb der Haupttrackingphase bei Direktstrahlung dieser Wert nicht unterschritten wird. Unterhalb dieses Grenzwertes findet keine Azimutkorrektur statt. Vom Grenzwert zur Deaktivierung des Trackings von $15.000 \text{ lx} \approx 269 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (vgl. Anhang 29) ist der Grenzwert zur Azimutkorrektur weit genug entfernt, sodass er in der Hauptauswertung der Diffusstrahlung keine Ergebnisse verfälschen kann.

Alle Beleuchtungsstärken aller Messtage des Nord- und Südsensors werden bei $> 600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ mit dem zeitabhängigen Azimutkorrekturfaktor verrechnet. Obwohl die Einheit der Faktorbildung die Bestrahlungsstärke ist, kann dieser Faktor aufgrund des annähernd linearen Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsstärke und Bestrahlungsstärke bei Bestrahlungsstärken $> 600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ auch mit der Beleuchtungsstärke verrechnet werden.

Anschließend wird die endgültige Kalibrierfunktion gebildet (vgl. Anhang 29), bei der die Messwerte der Bestrahlungsstärken $> 600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ viel weniger streuen als bei der Vorkalibrierung (vgl. Anhang 25). An allen Messtagen werden die Beleuchtungsstärken des Nord- und Südsensors nach Anwendung der Azimutkorrektur durch ihre jeweilige, endgültig kalibrierte Ausgleichsfunktion in Bestrahlungsstärken umgerechnet. Diese werden durch Mittelwertbildung zum temperaturunkorrigierten Messwert RAGMAR's in Trackingebene zusammengefasst.

Das Yportal liefert sowohl die raw-Bestrahlungsstärke als auch die temperaturkorrigierte Bestrahlungsstärke. Da auf die raw-Bestrahlungsstärken der PVF X kalibriert wurde, wird der zeitspezifische Temperaturkorrekturfaktor zwischen raw-Bestrahlungsstärke und temperaturkorrigierter Bestrahlungsstärke gebildet, der der Ausgleichsfunktion von Anhang 26 ähnelt. Dieser wird mit dem temperaturunkorrigierten Messwert RAGMAR's in Trackingebene verrechnet, sodass der temperaturkorrigierte Messwert RAGMAR's in Trackingebene, auch als Messwert RAGMAR's bezeichnet, mit dem temperaturkorrigierten Messwert des Pyranometers 8 der PVF X, auch als Messwert der PVF X bezeichnet, verglichen werden kann.

Für den 01.06.2022 ist der Vergleich der Messwerte der PVF X mit den Messwerten RAGMAR's in Abbildung 24 dargestellt. Außerdem ist in Form der grauen Funktion ausgedrückt, ob ein Vergleich der Messwerte zulässig ist. Ein Vergleich wird innerhalb der Haupttrackingphase als zulässig festgelegt, wenn die gemessene Abweichung zwischen RAGMAR's Neigungswinkel und dem Neigungswinkel der PVF X kleiner als 7° ist, was der Messunsicherheit aus Kapitel 3.1.3 entspricht. Außerdem ist ein Vergleich zulässig, wenn durch die vct-Steuerung die astronomische Steuerung deaktiviert wird. Ein Vergleich ist unzulässig, wenn der Neigungswinkel RAGMAR's von der zu installierenden vct-Steuerung der PVF X abweicht, dargestellt in Anhang 24, da RAGMAR kein Backtracking berücksichtigt. Dazu einige Beispiele:

Nach 18:40 Uhr in Abbildung 24 ist der Vergleich unzulässig, weil dort der Backtrackingalgorithmus der PVF X beginnt, der auf RAGMAR nicht installiert ist. Um 06:00 Uhr neigt sich RAGMAR aufgrund der Grenzwertüberschreitung direkt auf -46° , während der Backtrackingalgorithmus der PVF X aktiv ist. Ein Vergleich ist solange unzulässig, bis auch der Backtrackingalgorithmus -46° erreicht hat, was um 08:20 Uhr der Fall ist. Würde die vct-Steuerung allerdings morgens während der Phase des Backtrackings RAGMAR auf 0° verweilen lassen, wäre ein Vergleich zulässig. Gegen Abend soll RAGMAR in jedem Fall dem Backtrackingalgorithmus zu 0° zurückfolgen, sodass ein Vergleich unzulässig wäre, sobald der Neigungswinkel RAGMAR's größer wäre als der der PVF X (vgl. Abbildung 22).

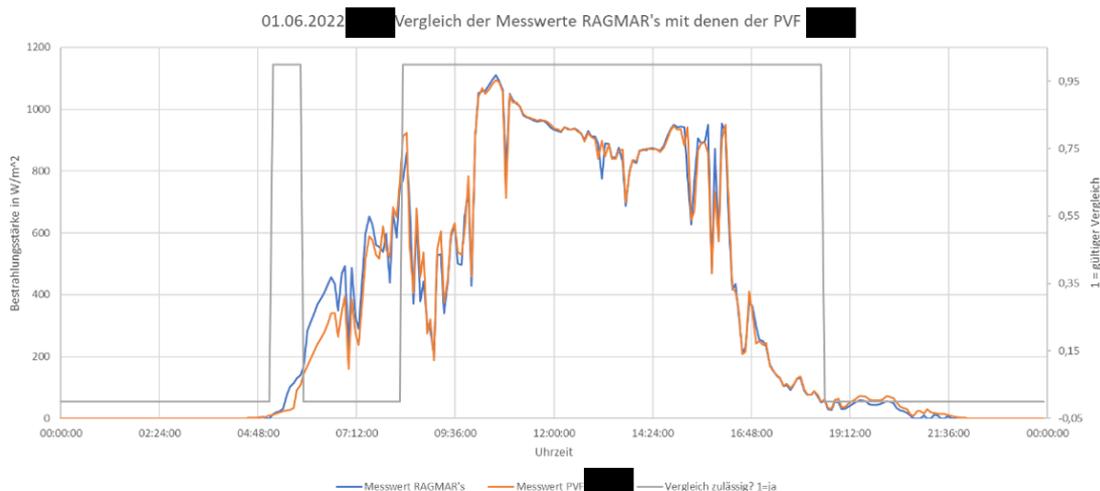


Abbildung 24 01.06.2022 X Vergleich der Messwerte RAGMAR's mit denen der PVF X. Auf der Primärachse ist die Bestrahlungsstärke der PVF X in orange und die Bestrahlungsstärke RAGMAR's in blau in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Die graue Funktion der Sekundärachse gibt an, ob ein Vergleich zwischen den Funktionen zulässig ist und in der Auswertung mitberücksichtigt werden kann (eigenes Diagramm).

Die Auswertung des erzielten Tagesmehrertrags der vct-Steuerung umfasst nicht nur einen direkten Vergleich der Messwerte im Vergleichszeitraum, sondern durch folgende Maßnahmen werden fehlerhafte Annahmen weiter eingeschränkt:

Es fließt nur der Vergleich bei Abweichungen der vct-Steuerung von der astronomischen Steuerung in die Auswertung mit ein. Der Mehrertrag bei nahezu gleichem Neigungswinkel wird somit nicht berücksichtigt. Am 01.06.2022 wäre dieser Zeitraum mit gleichen Neigungswinkeln von 08:30 Uhr bis 18:40 Uhr (vgl. Abbildung 24) und am 02.06.2022 von 10:50 Uhr bis 13:25 Uhr (vgl. Abbildung 22). Am 02.06.2022 hat die vct-Steuerung rechnerisch $11,98 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ Mehrertrag im Vergleich zur PVF X im Zeitraum gleicher Neigungswinkel erbracht, was einem Mehrertrag der vct-Steuerung von 0,902 % entspricht (vgl. Abbildung 25). Da theoretisch der Mehrertrag bei gleichen Neigungswinkeln = 0 sein müsste, werden die $11,98 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Dieser Zeitraum gleicher Neigungswinkel bildet darüber hinaus ein Maß für die aktuelle Tages-Performance bei Beleuchtungsstärken > 15.000 lx. Am 02.06.2022 wird daher angenommen, dass auch während der Steuerungsabweichungsphase von zum Beispiel 13:20 Uhr bis 14:40 Uhr, RAGMAR grundsätzlich 0,902 % mehr Ertrag erbringt als die astronomische Steuerung. Bei einem Gesamttagesmehrertrag der Bestrahlung RAGMAR's von $101,46 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ am 02.06.2022 (vgl. Abbildung 25), ergibt sich der um 0,902 % korrigierte Tagesmehrertrag zu:

$$\frac{101,46 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} - 11,98 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1,00902} = 88,67 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \quad (22)$$

Dies entspricht einem Tagesmehrertrag von 6,68 % (vgl. Abbildung 25).

Für den Vergleich des ermittelten Tagesmehrertrags mit der Literatur wurde die Studie von Quesada et al. (2015) herangezogen. Der Tagesmehrertrag eines bewölkten Tags am 25. Juli in Montreal wurde zu 7,95 % für ein horizontalen PV-Modul gegenüber einem zweiachsig trackenden PV-Modul simuliert (Quesada et al. 2015: 152). Das kommt RAGMAR's Ergebnis sehr nahe, da RAGMAR während dieses Tages nicht vollständig auf 0 ° geblieben ist (vgl. Abbildung 22) und dadurch nur einen geringeren Mehrertrag erzielen konnte. In der Simulation dagegen wurde der Grenzwert des Trackings den ganzen Tag nicht überschritten.

Durch diese Auswertungsmethode können auch die Fehler des Neigungswinkels und der Zeitabweichung zum Teil ausgeglichen werden: Liegt wie in Abbildung 22 eine größtenteils konstant bleibende Neigungswinkelabweichung vor, so bleibt auch die prozentuale Abweichung der gemessenen Bestrahlungsstärke nahezu konstant (vgl. Formel 15 und 17). Da aufgrund der astronomischen Steuerung eine Zeitabweichung eine Neigungswinkelabweichung bewirkt (vgl. Kapitel 3.1.2), verhält sich dieser Fehler ähnlich.

Außerdem kann es einen Minderertrag durch das Umschwenkverhalten RAGMAR's geben: Wenn RAGMAR auf 0 ° steht und direktes Licht auf RAGMAR's Sensoren trifft, dreht RAGMAR zur zugehörigen Position der astronomischen Steuerung. Während des Umschwenkens auf diese Position, steht RAGMAR allerdings nicht optimal zum direkten Licht ausgerichtet: Es entsteht Minderertrag. Um diesen mit der PVF X vergleichen zu können, wurde die Trackinggeschwindigkeit RAGMAR's der der PVF X angenähert. Nur wenn während der Umschwenkphase Mindererträge RAGMAR's zu erkennen sind und die Umschwenkphase außerhalb der Haupttrackingphase liegt, werden Verluste dadurch zusätzlich abgezogen. Am 02.06.2022 war kein Minderertrag RAGMAR's während der Umschwenkphase erchenbar (vgl. Abbildung 25).

Um die Einsparung an Trackingenergie RAGMAR's zu bestimmen, wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die PVF X eine tageskonstante Menge Energie benötigt, um den Tracker um 1° zu bewegen. Die Erkenntnisse von Kapitels 4.1 sind, dass die Trackingenergie in Abhängigkeit der Trackerposition variieren kann, je nachdem ob mit oder gegen die Schwerkraft getrackt wird. Wenn die vct-Steuerung beispielsweise bewirkt, dass sich der Tracker morgens nur um 20° nach Osten neigt und von dieser Position wieder mittags zu 0° trackt, dann wären 26° mit und 26° Neigung entgegen der Schwerkraft eingespart worden. Da es sich hierbei immer um die gleichen Anteile Energieeinsparungen mit und entgegen der Schwerkraft handelt, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

Zur Errechnung der Tracker-Energieeinsparung wird der Stromfluss vom Akku zum Motor, der Stromfluss vom nachgeschalteten Spannungswandler des PV-Moduls zum Akku und die Neigungswinkel der PVF X und RAGMAR's verwendet. Die benötigte Energie pro Grad Tracking ergibt sich durch Division von 234° durch die tägliche Summe der zum Motor fließenden Energie. 234° entsprechen der nach dem astronomischen Tracking theoretisch konstanten Trackinggradsumme der PVF X pro Tag (vgl. Abbildung 22):

$$25^\circ \cdot 2 \text{ (Nachtposition)} + 4 \cdot 46^\circ \text{ (Haupt – und Backtrackingphase)} = 234^\circ \quad (23)$$

An allen ausgewerteten Tagen bleibt die Akkuspannung am Tagesanfang und Tagesende nahezu konstant, sodass davon ausgegangen werden kann, dass nicht mehr Energie aus dem Akku fließt als aufgenommen wird. Die tägliche Summe der zum Motor fließenden Energie errechnet sich durch Multiplikation des Tagesmittelwertes des Stromflusses zum Akku mit konstant 24 V Akkunennspannung und mit $24 \frac{\text{h}}{\text{d}}$.

Die Deaktivierung der astronomischen Steuerung durch die vct-Steuerung bewirkt, dass RAGMAR nicht immer um 234° trackt, sondern gleich viel oder weniger wie am 02.06.2022, wo RAGMAR um $63,26^\circ$ weniger trackt als die PVF X (vgl. Abbildung 25 und Abbildung 22). Zur Errechnung der Energieeinsparung wird unterschieden in die Energieeinsparung RAMGAR's und die mögliche Energieeinsparung. Die Energieeinsparung RAGMAR's berücksichtigt die Energieeinsparung RAGMAR's im Vergleich zur PVF X in der Haupt- und Backtrackingphase und errechnet sich durch Multiplikation der Neigungswinkeleinsparung mit der durchschnittlichen am Tag aufgewendeten Energie pro Grad Tracking. Da das Fahren auf die Nachtposition theoretisch auch deaktiviert werden kann, könnte pauschal jeden Tag um 50° weniger getrackt werden. Dies wird zusätzlich in der möglichen Energieeinsparung berücksichtigt (vgl. Abbildung 25).

Die prozentuale Energieeinsparung wird auf die Tagessumme der Energie bezogen, die zum Akku fließt, da auch noch Energie für die Elektronik aufgewendet werden muss. Speicherverluste, die in der Energiesumme zum Akku enthalten sind, können von den Elektronikverlusten nicht differenziert werden. Die Energieeinsparung RAGMAR's beträgt für den 02.06.2022 20,86 % der von dem Akku aufgenommenen Energie und 37,35 %, wenn der Tracker nachts zusätzlich nicht auf die Sturmposition fahren würde (vgl. Abbildung 25).

Beschreibung	absoluter Wert A()	prozentualer Wert P()	Berechnung absoluter Werte
Energie vom Akku zum Motor der PVF	11,47 $\frac{Wh}{d}$	77,17 %	(1)
Energie vom Spannungswandler des PV-Moduls zum Akku der PVF	14,87 $\frac{Wh}{d}$	100 %	(2)
Akku Spannungsdifferenz der PVF	0,1 V		(3)
Elektronik & Verluste der PVF	3,39 $\frac{Wh}{d}$	22,83 %	(4) = A(2) – A(1)
Neigungswinkelsumme Tracking der PVF	234 $\frac{^\circ}{d}$		(5)
Energie Tracking der PVF	0,05 $\frac{Wh}{^\circ}$		(6) = A(1) / A(5)
Einsparung Neigungswinkel Tracking RAGMAR	63,26 $^\circ$		(7)
Energieeinsparung / Tracker RAGMAR	3,10 $\frac{Wh}{d}$	20,86 %	(8) = A(6) · A(7)
Energieeinsparung / Tracker möglich	5,55 $\frac{Wh}{d}$	37,35 %	(9) = A(8) + A(6) · 50
aktueller Mehrertrag RAGMAR	101,46 $\frac{Wh}{m^2 \cdot d}$	7,64 %	(10)
Mehrertrag vor Korrektur	11,98 $\frac{Wh}{m^2 \cdot d}$	0,902 %	(11)
Abzug Umschwenkverhalten	0 $\frac{Wh}{m^2 \cdot d}$		(12)
Mehrertrag RAGMAR final	88,67 $\frac{Wh}{m^2 \cdot d}$	6,68 %	(13) = (A(10) – A(11)) / (1 + P(11) / 100)
Tagessumme Bestrahlung	1.328 $\frac{Wh}{m^2 \cdot d}$	100 %	(14)

Abbildung 25 Tagesauswertung der Energieeinsparung und Bestahlungsmehrerträge RAGMAR's vom 02.06.2022. Grau gefärbte Zellen beschreiben die Berechnungen zur Energieeinsparung des Trackings. Gelbe Zellen beschreiben die Berechnungen des Mehrertrags RAGMAR's. Die fettgedruckten Werte werden in der weiteren Auswertung berücksichtigt. In der rechten Spalte wird die im Fließtext erklärte Berechnung beispielsweise für diesen Tag durchgeführt. Absolute Werte sind dort mit „A()“ gekennzeichnet, prozentuale Werte mit „P()“. Prozentuale Angaben beziehen sich auf die Performance der astronomischen Steuerung (eigene Berechnungen).

Nach Erklärung, wie die die Werte aus Abbildung 25 für den 02.06.2022 errechnet wurden, soll nun der urchzeitabhängige Mehrertrag dieses Diffuslichttages von Abbildung 26 erörtert werden.

Negative Mehrerträge RAGMAR's entstehen in frühen Morgen- und Abendstunden aufgrund des Horizontleuchtens (Quaschnig 2019: 87). Da es sich aber während dieser Zeit um sehr geringe Bestrahlungsstärken handelt, fällt auch der absolute Minderertrag sehr gering aus. Während der Haupttrackingphase kommt kaum Minderertrag vor. Der kurzzeitige, prozentuale Mehrertrag der vct-Steuerung im Vergleich zur PVF X kann bis zu 30 % betragen.

Als Vergleich wird die Studie von Quesada et al. (2015) verwendet. Am 25. Juni wurden durch ein horizontales PV-Modul bis zu 32,8 % mehr Energie im Vergleich zu einem zweiachsig trackenden PV-Modul in Montreal simuliert (Quesada et al. 2015: 152), was RAGMAR's Ergebnis sehr nahe kommt. Außerhalb von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang gilt bei Diffusstrahlung: Je weiter der Neigungswinkel der PVF X von 0 ° abweicht, desto größer ist der prozentuale Mehrertrag der vct-Steuerung (vgl. Abbildung 26), was auch mit der Literatur übereinstimmt (vgl. Abbildung 8).

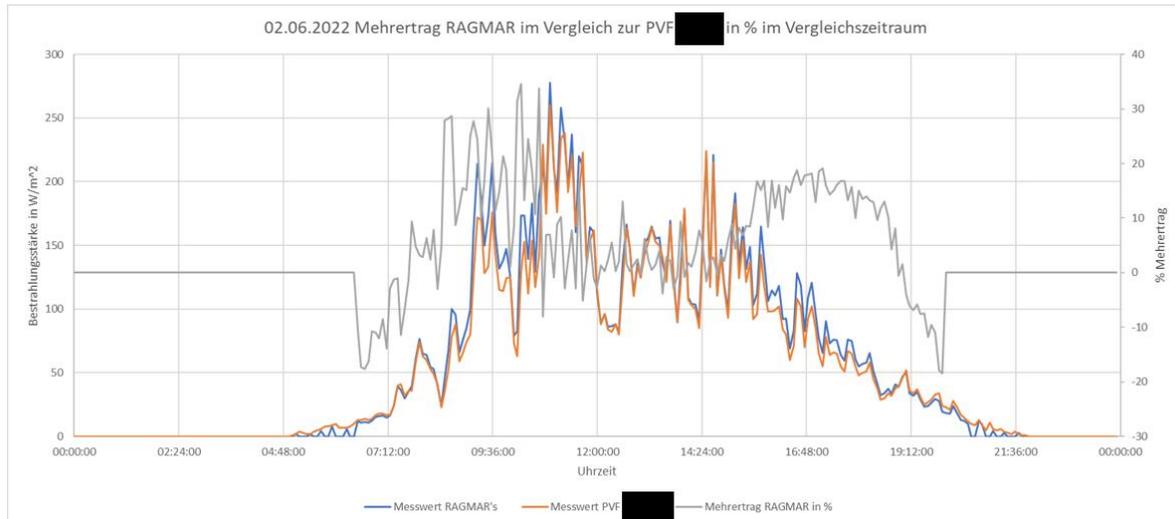


Abbildung 26 02.06.2022 Mehrertrag RAGMAR im Vergleich zur PVF X in % im Vergleichszeitraum. Auf der Primärachse ist die Bestrahlungsstärke RAGMAR's (blaue Funktion) und die der PVF X (orangene Funktion) in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Die graue Funktion der Sekundärachse beschreibt den prozentualen Mehrertrag RAGMAR's im Vergleich zur PVF X (eigenes Diagramm).

An Tagen mit überwiegend direkter Strahlung, sollte sich die vct-Steuerung genauso verhalten wie die Steuerung der PVF X. Allerdings können auch hier aufgrund des Horizontleuchtens Mindererträge der vct-Steuerung am Morgen auftreten, bevor der Grenzwert des Trackings überschritten wird (vgl. Anhang 30). Gegen Abend kommen hier nur Mindererträge vor, wenn in der 2. Tageshälfte die vct-Steuerung ein Tracken verhindert hat, das heißt an Tagen mit Direktstrahlung gibt es keinen Minderertrag am Abend. Durch die Monats- und Stundenabhängigkeit des Grenzwerts der vct-Steuerung, die auf der PVF X installiert werden könnte, ist zu erwarten, dass der beschriebene Minderertrag aufgrund höherer Grenzwertgenauigkeit weiter sinkt.

Die Abzüge der vct-Steuerung während der Umschwenkzeit fallen vernachlässigbar klein aus: Am 04.07.2022 sind es $1,77 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$. Im Vergleich dazu liegt der Mehrertrag der vct-Steuerung am 02.06.2022 bei $88,67 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$, was bedeutet, dass die Summe der Mindererträge der Umschwenkzeit von circa 50 Tagen durch einen Diffusstrahlungstag kompensiert werden können.

Tage wechselhafter Bewölkung verhalten sich wie ein Direktstrahlungstag, solange der Grenzwert des Trackings im Tagesverlauf nicht unterschritten wird, da sich in diesem Fall die vct-Steuerung genauso verhalten würde wie die der PVF X. Auch wenn der Grenzwert kurzzeitig aufgrund einer Wolke unterschritten wird, aber wenige Minuten später wieder eine Grenzwertüberschreitung vorliegt, sobald die Wolke vorbeigezogen ist, entsteht durch die vct-Steuerung kaum eine Neigungswinkelabweichung und deshalb auch so gut wie kein Mehrertrag. Erst bei wechselhafter Bewölkung mit längerer Unterschreitung des Grenzwertes wie am 02.06.2022 von 13:30 Uhr bis 14:25 Uhr der Fall, ist der Mehrertrag RAGMAR's geringfügig zu erkennen (vgl. Abbildung 26) und steigt mit Dauer und Zunahme der Neigungswinkelabweichung.

5.2 Abschätzung des möglichen Jahresmehrertrags

Die Ergebnisse des Mehrertrags der ersten Messperiode sind in Abbildung 27 dargestellt. Die Ergebnisse der zweiten Messperiode werden nicht für die rechnerische Auswertung des Mehrertrags verwendet, da diese mit einem zu großen Messfehler behaftet sind, aber sie sind trotzdem in Anhang 31 zu sehen. Der erzielte Mehrertrag ist indirekt abhängig von der Tagessumme der gemessenen Bestrahlung der PVF X: Je geringer die Tagessumme der Bestrahlung ist, desto größer ist der mögliche Mehrertrag (vgl. Abbildung 27). Maximal konnte innerhalb der 9 Tage umfassenden Messperiode ein Mehrertrag von 6,68 % am 02.06.2022 und ein absoluter Mehrertrag von $113,61 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ am 09.06.2022 erzielt werden. Minimal betrug der Mehrertrag am 04.06.2022 $-16,30 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ beziehungsweise -0,15 %, was zum kleinen Teil auf die Verluste der Umschwenkzeit und die Verluste am Morgen vor der Grenzwertüberschreitung (vgl. Anhang 30) zurückzuführen ist. Der entscheidende Teil des negativen Ertrags sollte jedoch auf Messfehlern und einer nicht optimalen Grenzwertwahl basieren, sodass negative Erträge bei einer Praxisumsetzung vernachlässigbar gering ausfallen.

Eine indirekte Abhängigkeit zwischen Tagessumme der Bestrahlung und Mehrertrag besteht, weil die Wahrscheinlichkeit des zunehmenden Mehrertrags bei geringerer Bestrahlung steigt: Ein Mehrertrag durch die vct-Steuerung kann immer dann entstehen, wenn der Grenzwert der Bestrahlungsstärke unterschritten ist, da dies eine Neigungswinkelabweichung zur Folge hat, was durch die optimierte Trackerstellung einen Mehrertrag bewirkt. Je niedriger die Tagessumme der Bestrahlungsstärke ist, desto mehr Diffuslicht kommt am jeweiligen Tag vor, desto wahrscheinlicher wird eine Grenzwertüberschreitung.

Allerdings handelt es sich hierbei nicht um eine physikalische Abhängigkeit: Wird zum Beispiel ein Tag mit Diffuslicht betrachtet, an dem der Grenzwert immer knapp überschritten bleibt und dadurch das Tracking nicht deaktiviert wird, wird auch kein Mehrertrag erzielt. An einem Tag, an dem der Grenzwert immer knapp unterschritten wird, wird durch eine dauerhafte Aktivierung der vct-Steuerung der Mehrertrag sehr viel größer ausfallen. Kurze Direktstrahlungsphasen können zudem die Tagessumme der Bestrahlung erheblich erhöhen, wohingegen ihr Einfluss auf den Mehrertrag geringer ausfällt. Dass hierbei große Schwankungen vorkommen können, wird bei den 3 orangenen und blauen Auswertungspunkten in Abbildung 27 deutlich, die bei einer Tagessumme der Bestrahlung von circa $2300 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ stark abweichende Mehrerträge von circa 1 bis 5 % erzielen.

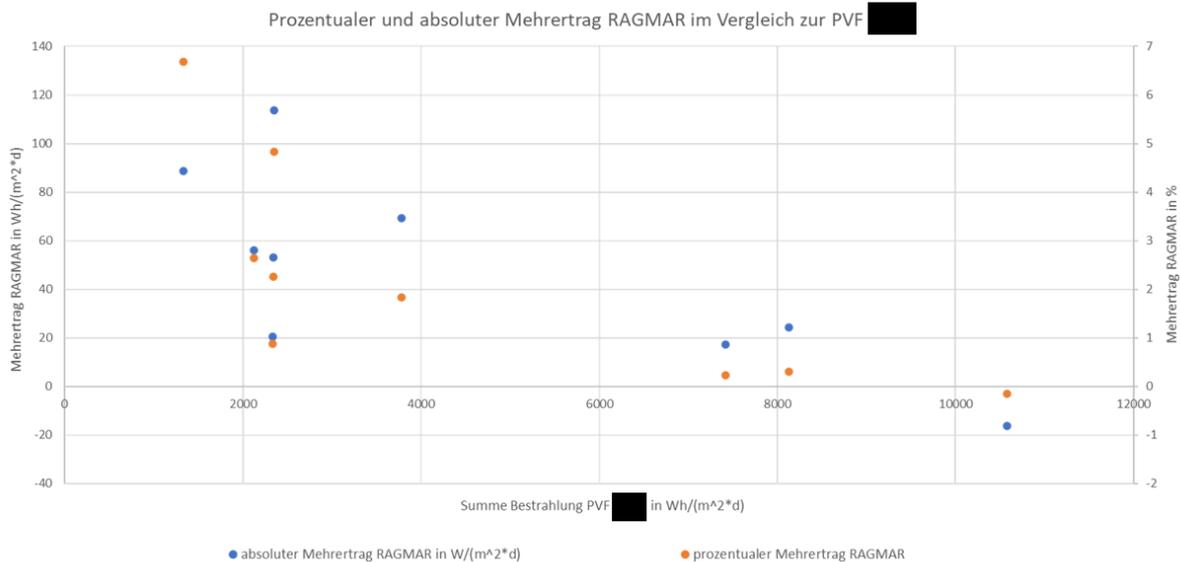


Abbildung 27 Prozentualer und absoluter Mehrertrag RAGMAR im Vergleich zur PVF X. Die Tagesauswertung der ersten Messperiode von 9 Tagen bezüglich des erzielten Mehrertrags der Bestrahlung RAGMAR's ist im Diagramm in Form von je 9 blauen und orangenen Auswertungspunkten in Abhängigkeit von der Bestrahlung des jeweiligen Tages dargestellt. Dabei ist der absolute Mehrertrag in Form der blauen Messpunkte auf der Primärachse und der prozentuale Mehrertrag, bezogen auf die Tagessumme der Bestrahlung der PVF X, in Form von orangenen Messpunkten auf der Sekundärachse dargestellt. Ein Beispiel: Am 02.06.2022 hat RAGMAR's vct-Steuerung bei einer Tagessumme der Bestrahlung von $1328 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ einen absoluten Mehrertrag von $88,67 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ und einen prozentualen Mehrertrag von $(88,67 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}) / (1328 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}) = 6,68 \%$ erzielen können, was den beiden Auswertungspunkten ganz links im Diagramm entspricht. Es fällt auf, dass der absolute Mehrertrag nicht unbedingt bei den geringsten Bestrahlungstagesummen am größten ausfällt (eigenes Diagramm).

Um einschätzen zu können, wie viel Mehrertrag pro Jahr erzielt werden kann, werden die Ergebnisse der ersten Messperiode auf ein Jahr hochgerechnet: Es wird der Zeitraum vom 31.05.2021 bis zum 31.05.2022 berücksichtigt. Dazu wird die stochastische Abhängigkeit der prozentualen Mehrerträge der vct-Steuerung von der Tagessumme der Bestrahlung der PVF X von Abbildung 27 als Hochrechnungskriterium verwendet. Da es sich bei dem Zusammenhang zwischen Mehrertrag und Tagessumme der Bestrahlung um keinen physikalischen Zusammenhang handelt, ist diese Hochrechnung eine fehlerbehaftete Prognose.

Die Auswertungspunkte werden für die Hochrechnung in Form von Ausgleichsfunktionen verallgemeinert: Der prozentuale Mehrertrag der vct-Steuerung ist bei Tagessummen der Bestrahlung $> 6000 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ so gut wie nicht mehr abhängig von derselben (vgl. Abbildung 27). Diese Theorie wird hilfsweise durch die 2. Messperiode bestätigt (vgl. Anhang 31). Deshalb wird aus den 3 Messwerten $> 6000 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ ein Mittelwert gebildet und als konstanter Faktor für die Hochrechnung verwendet (vgl. Abbildung 28). Die anderen Auswertungspunkte werden durch bestrahlungsabhängige Funktionen beschrieben: Eine lineare und eine logarithmische Funktion (vgl. Abbildung 28). Der fließende Übergang zwischen konstantem Faktor der 3 Messwerte $> 6000 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ und der jeweiligen Ausgleichsfunktion bewirkt, dass schon alle Messwerte, die größer als circa $4200 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ sind, abhängig

von der jeweiligen Ausgleichsfunktion, im Prognosemodell als konstanter Faktor verrechnet werden (vgl. Abbildung 28).

Da die Varianz der Auswertungspunkte zur logarithmischen Funktion minimal geringer ausfallen als zur linearen Funktion, ist die logarithmische Funktion für eine Hochrechnung etwas besser geeignet.

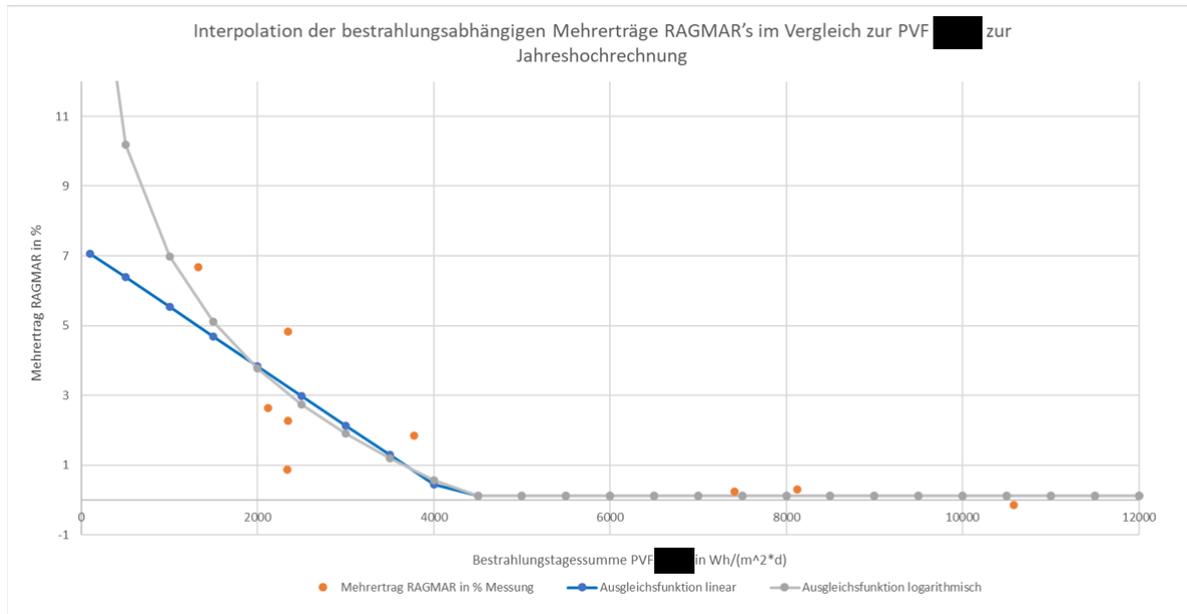


Abbildung 28 Interpolation der bestrahlungsabhängigen Mehrerträge RAGMAR's im Vergleich zur PVF X zur Jahreshochrechnung. Die Mehrerträge sind in Abhängigkeit von der Tagessumme der Bestrahlung der PVF X dargestellt. Die ausgewerteten Mehrerträge der Bestrahlung der ersten Messperiode RAGMAR's sind im Diagramm in orange abgebildet. Daraus wurden zwei Interpolationsfunktionen gebildet: eine lineare in blau und eine logarithmische in grau, die ab geringeren Bestrahlungstagesummen als circa $4200 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ gelten. Die Messpunkte weichen durchschnittlich um 1,45 % von der linearen Regression ab, von der logarithmischen Funktion um 1,27 %. Oberhalb dieses Grenzwertes wird eine Mittelwertbildung der drei rechten Messpunkte angewendet, das heißt ein konstanter Mehrertrag RAGMAR's von circa 0,1254 % (eigenes Diagramm).

Die maximalen Bestrahlungstagesummen aller Pyranometer der PVF X werden zur Hochrechnung verwendet, um zahlreiche Pyranometer- und Trackerausfälle, gerade in den Wintermonaten, aus der Berechnung auszuschließen. Mit Hilfe der ermittelten Ausgleichsfunktionen von Abbildung 28 werden die maximalen Bestrahlungssummen der PVF X pro Tag in prognostizierte, prozentuale Mehrerträge der vct-Steuerung umgerechnet. In Anhang 32 ist eine solche Prognose für die logarithmische Ausgleichsfunktion dargestellt. Demzufolge sind bis zu 18 % Tagesmehrertrag in den Wintermonaten mit niedriger Bestrahlungstagesumme theoretisch möglich.

Um den Mehrertrag der Wintermonate zu verifizieren, wird mit den Studien von Kelly/Gibson (2011) und Quesada et al. (2015) verglichen, die jedoch zweiachsige Tracker verwendet haben. Es ist anzunehmen, dass der Mehrertrag in den Wintermonaten teilweise weitaus größer ausfallen könnte, da in Montreal beispielsweise am 29.12. 32,59 % Tagesmehrertrag eines horizontalen Moduls gegenüber einem trackenden Modul simuliert wurden (Quesada et al. 2015: 152). In Detroit wurden bis zu 37 % Mehrertrag eines horizontalen Moduls im Vergleich zu einem trackenden Modul gemessen (Kelly/Gibson 2011: 123). Wird der Grenzwert des Trackings den ganzen Tag lang nicht überschritten, entspricht die Trackerstellung der vct-Steuerung einer horizontalen Fläche.

Anhang 32 zeigt allerdings auch die Grenzen dieses Modells: Obwohl auch negative Mehrerträge der vct-Steuerung festgestellt wurden, sind diese nicht im Hochrechnungsmodell zu erkennen, allerdings durch die Mittelwertbildung trotzdem in die Auswertung mit eingegangen. Auch wird angenommen, dass sich der Mehrertrag unabhängig von der Jahreszeit verhält, was aber unter anderem aufgrund der tiefer stehenden Sonne im Winter, nicht der Fall ist: Im Winter ist der Grenzwert des Trackings geringer als im Sommer (Quesada et al. 2015: 151) und die Bestrahlungstagesumme sinkt, wodurch die Prognose im Winter für teilweise bewölkte Tage auch zu hoch ausfallen könnte. Dem gegenüber stehen die bereits erwähnten, größeren Mehrerträge aus der Literatur im Winter bei bedecktem Himmel. Was von beidem im Prognosemodell den größeren Einfluss ausübt, ist abhängig von den Wetterverhältnissen im Winter und lässt sich ohne eigene Messungen im Winter nicht beurteilen. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass im Winter ein hoher prozentualer Mehrertrag zu erwarten ist.

Die prozentualen Mehrerträge, die sich auf die Bestrahlung beziehen, sollen in absolute Anlagenmehrerträge der PVF X in kWh umgerechnet werden.

Die in Anhang 32 errechneten, prozentualen Mehrerträge der Bestrahlung, werden durch Multiplikation mit der Bestrahlungssumme des jeweiligen Tages in absolute Mehrerträge der Bestrahlung in $\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ umgerechnet.

Es wird die Ausgleichsfunktion von Anhang 33 verwendet, die die Beziehung zwischen den Tagessummen der Bestrahlung und Tagessummen ausfallkompensierter Wechselrichtererträge bei einem hochgerechneten PR von 100 % beinhalten. Die genaue Erklärung der Ausgleichsfunktion ist in Anhang 33 enthalten. Damit werden die absoluten Mehrerträge der Bestrahlung in absolute, ausfallkompensierte Mehrerträge der Wechselrichter bei einem PR von 100 % umgerechnet.

Da zwischen Wechselrichtererträgen und Einspeisung auch Transformatorverluste zu berücksichtigen sind, werden diese durch den Quotienten aus ausfallkompensierten Wechselrichtererträgen und Transformatorerträgen errechnet. Wegen großer Streuung der Transformatorverluste aufgrund der nicht kompensierten Ausfälle der Transformatorerträge wird der Median als Größe des mittleren Verlustes zwischen Wechselrichter und Transformator verwendet. Dieser beträgt 1,17 %. Um den absoluten, ausfallkompensierten Mehrertrag der Transformatoren bei einem PR von 100 % zu erhalten, werden die absoluten, ausfallkompensierten Mehrerträge der Wechselrichter bei einem PR von 100 % um den Verlustfaktor der Transformatoren von 1,17 % verringert. Dies entspricht nicht dem Lastgang der PVF X, da dieser sowohl die Südausrichtung des Parks als auch die Tracker beinhaltet (vgl. Kapitel 2.4).

Das PR von 100 %, auf das die Berechnung bezogen ist, wird durch Multiplikation mit dem PR des jeweiligen Monats (vgl. Anhang 20) heruntergerechnet, sodass der absolute, ausfallkompensierte Mehrertrag der Transformatoren das Endergebnis darstellt. Zu beachten ist, dass sich dieser absolute Mehrertrag um den nicht errechneten Verlust zwischen Transformator und Einspeisepunkt reduziert.

Es ergibt sich nach linearer Regression der prozentualen Mehrerträge der Bestrahlungsstärke (vgl. Abbildung 28) ein prognostizierter Anlagenmehrertrag von 606 MWh/a, was 1,39 % des Tracker-Anlagenjahresertrags entspricht. Nach logarithmischer Interpolation der prozentualen Mehrerträge der Bestrahlungsstärke (vgl. Abbildung 28) ergibt sich ein prognostizierter Anlagenmehrertrag von 673 MWh, was 1,54 % des Tracker-Anlagenjahresertrags entspricht. Da die Anlagenmehrerträge auf Basis der ausfallkompensierten Wechselrichtererträge, hochgerechnet auf Transformatorerträge, berechnet wurden, wurde auch der prozentuale Anlagenmehrertrag auf die gleiche Größe bezogen.

Zum Literaturvergleich werden die Studien von Kelly/Gibson (2011) und Gallegos et al. (2020) verwendet. Im Vergleich zum zweiachsigen Tracking wurde für Detroit ein jährlicher Mehrertrag einer

diffuslichtoptimierten Steuerung von circa 1 % im Vergleich zu einer astronomischen Nachführung ermittelt (Kelly/Gibson 2011: 123). Es ist zu erwarten, dass der jährliche Mehrertrag einer einachsigen Ost/West-Nachführung etwas größer als 1 % ausfällt, da der prozentuale Bezug, das heißt die absolute produzierte Menge Energie pro Jahr, beim zweiachsigen Tracking größer ist als beim einachsigen Tracking. Das ist hauptsächlich auf den Mehrertrag bei Direktstrahlung zurückzuführen. Rodríguez-Gallegos et al. (2020: 1476) hat den Mehrertrag einer diffuslichtoptimierten Steuerung in Abhängigkeit des Breitengrades bei Ost/West-Trackern untersucht. Für den Breitengrad der PVF X ergibt sich ein Mehrertrag von circa 1,4 %.

Anhang 35 zeigt die Verteilung absoluter Mehrerträge für die verschiedenen Monate für beide Ausgleichsfunktionen. Die größten absoluten Mehrerträge sind von September bis Februar zu erwarten. Maximal können im Oktober laut Modell fast 100 MWh Mehrertrag erzielt werden, minimal sind es circa 35 MWh im Juni.

Obwohl die größte, absolute Diffusstrahlung laut Kapitel 2.4 von Mai bis Juli im Jahresdurchschnitt gemessen wird, fällt der absolute Mehrertrag dieser Monate vergleichsweise gering aus. Das könnte auf fehlerhafte Modelldarstellungen zurückzuführen sein oder daran liegen, dass in den Jahren 2021 und 2022 eine zufällig geringere Diffusstrahlung als jahresdurchschnittlich gemessen wurde. Auch kann es trotz größerem, absoluten Diffusstrahlungsanteil optimal sein, die Sonne zu tracken, sofern dort eine Helligkeitszunahme gemessen wird. Deshalb wäre es theoretisch möglich, dass in den Monaten mit der größten, absoluten Diffusstrahlung nicht der größte, absolute Mehrertrag der vct-Steuerung erzielt wird.

5.3 Abschätzung der möglichen Tracker-Energieeinsparungen

Die Ergebnisse der Tracker-Energieeinsparungen der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X der ersten und zweiten Messperiode sind in Abbildung 29 dargestellt. Die 2. Messperiode kann in diesem Fall zur Auswertung verwendet werden, da es sich hierbei nicht um einen Messwertevergleich zwischen RAGMAR und der PVF X handelt, sondern vielmehr um eine Abschätzung der möglichen Energieeinsparungen in Abhängigkeit zufälliger Grenzwertunterschreitungen im Tagesverlauf.

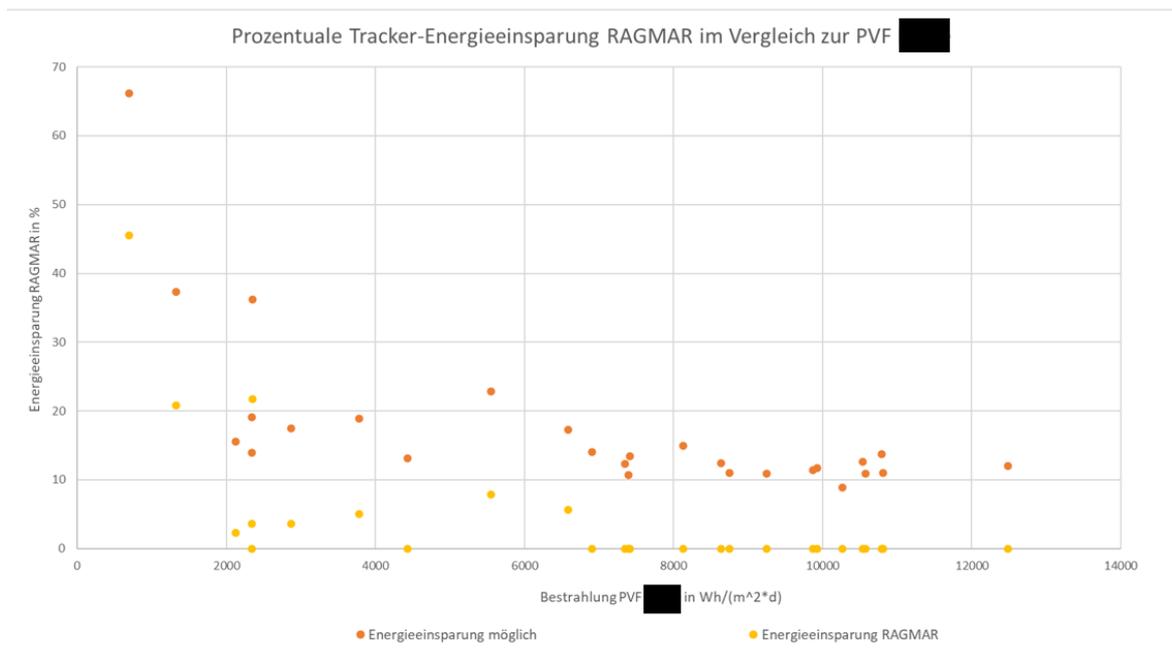


Abbildung 29 Prozentuale Tracker-Energieeinsparung RAGMAR im Vergleich zur PVF X. Die je 27 gelben und orangenen Auswertungspunkte fassen die errechnete Tracker-Energieeinsparung RAGMAR's an 27 Tagen der ersten und zweiten Messperiode zusammen. Die Energieeinsparung RAGMAR's ist prozentual auf der y-Achse in Abhängigkeit der Tagessumme der Bestrahlung der PVF X auf der x-Achse gegenübergestellt. Die orangenen Auswertungspunkte beschreiben die mögliche Energieeinsparung, wenn auf das Fahren auf die Nachtposition verzichtet wird. Die gelben Auswertungspunkte beschreiben die Energieeinsparung mit Fahren auf die Nachtposition (eigenes Diagramm).

Ähnlich wie bei der Ermittlung des Mehrertrags ist auch hier eine stochastische Bestrahlungsabhängigkeit zu erkennen: Je geringer die Tagessumme der Bestrahlung ist, desto wahrscheinlicher ist eine Steigerung der Energieeinsparung des Trackingsystems. Ein physikalischer Zusammenhang besteht auch hier nicht: An einem Tag absoluter Finsternis, an dem nur zweimal der Grenzwert des Trackings überschritten werden würde zu den Zeitpunkten der maximalen Neigungswinkel der PVF X von $\pm 46^\circ$, würde keine Trackingenergie eingespart werden, ebenso wenig wie an einem Tag mit durchgängiger Direktstrahlung.

Im Gegensatz zur Ermittlung des Mehrertrags sind weitaus größere, prozentuale Energieeinsparungen von bis zu 66 % bei der maximal möglichen Energieeinsparung wie zum Beispiel am 27.06.2022 möglich. 100 % können nicht erreicht werden, da die Elektronik ununterbrochen Energie benötigt. Weniger als 0 % Energieeinsparung sind aufgrund der vct-Steuerung theoretisch unmöglich. Dass die mögliche Energieeinsparung bei hoher Bestrahlungstagesumme schwankt, liegt daran, dass Elektronik- und Speicherverluste täglich verschieden stark schwanken.

Es werden zwei Ausgleichsfunktionen gebildet, die beide im Bereich geringer Tagessummen der Bestrahlung logarithmisch verlaufen, da im Vergleich zu einer linearen Interpolation, bei der logarithmischen Interpolation, die Summe der Abweichungsquadrate geringer ausfällt. Im Bereich hoher Tagessummen der Bestrahlung wird wie bei den Mehrerträgen auf Mittelwertbildung zurückgegriffen, mit fließendem Übergang zur logarithmischen Interpolationsfunktion (vgl. Abbildung 30). Maximal werden 61,28 % Energieeinsparung zugelassen, da die Elektronik- und Speicherverluste durchschnittlich 38,72 % des Gesamtenergieverbrauchs innerhalb der Messperiode

ausmachen. Minimal sind es circa 12 % bei der möglichen Energieeinsparung, da jeden Tag das Fahren auf die Nachtposition eingespart wird.

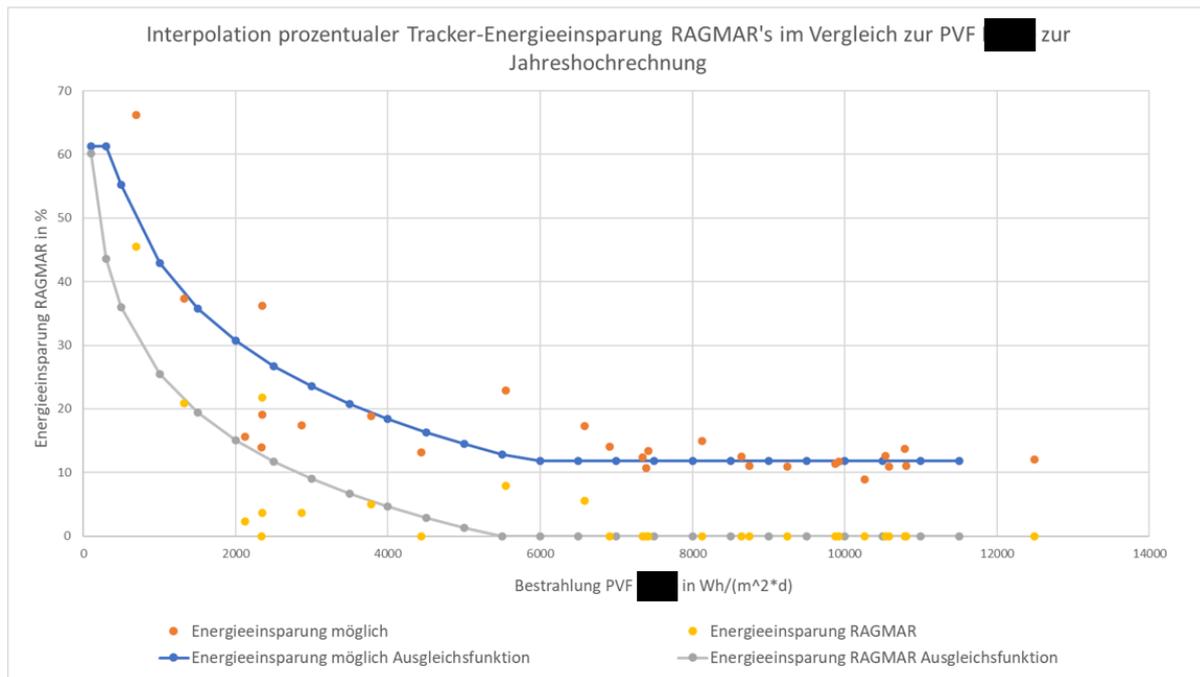


Abbildung 30 Interpolation prozentualer Tracker-Energieeinsparung RAGMAR's im Vergleich zur PVF X zur Jahreshochrechnung. Die mögliche Energieeinsparung RAGMAR's ohne die Nachtpositionsstellung auf 25 ° entspricht den orangenen Auswertungspunkten und die Energieeinsparung RAGMAR's mit Nachtpositionsstellung den gelben Punkten. Die Energieeinsparung ist in Abhängigkeit der Tagessumme der Bestrahlung der PVF X dargestellt. Die Interpolationsfunktionen verlaufen bei geringen Bestrahlungstagesummen circa $< 6000 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$, abhängig von der jeweiligen Ausgleichsfunktion, logarithmisch und bei den übrigen Bestrahlungstagesummen konstant, ermittelt durch Mittelwertbildung. Dabei ist die blaue Ausgleichsfunktion den orangenen Auswertungspunkten zuzuordnen und die graue Auswertungsfunktion den gelben Punkten. Die Messpunkte weichen von der logarithmischen Ausgleichsfunktion der möglichen Energieeinsparungen durchschnittlich um 8,04 % ab und von der Ausgleichsfunktion der Energieeinsparung RAGMAR's durchschnittlich 7,28 % (eigenes Diagramm).

Aus diesen Erkenntnissen werden die prognostizierten, prozentualen Energieeinsparungen des Akkus über ein Jahr für jede Ausgleichsfunktion errechnet. Die Ergebnisse der möglichen Energieeinsparung mit Deaktivierung des Fahrens auf die Nachtposition sind in Anhang 34 dargestellt. Im Winter sind aufgrund geringerer Bestrahlungstagesummen größere, prozentuale Energieeinsparungen zu erwarten, die an vielen Tagen auch die maximale Energieeinsparung von 61,28 % erreichen.

Eine absolute Jahresdarstellung ist nicht möglich, da nicht über ein Jahr gemessene Trackerdaten vorliegen. Die absolute Energie, die für das Tracking benötigt wird, liegt bei circa $11,5 \frac{\text{Wh}}{\text{Tracker} \cdot \text{d}}$, abhängig vom jeweiligen Tracker, dessen Reibung zwischen Lager und Trackerachse unterschiedlich sein kann und den Windverhältnissen, die das Tracking erschweren können.

Im November 2021 kam es zur Tiefenentladung der Trackerakkus. Es soll überprüft werden, ob durch Anwendung der vct-Steuerung eine Tiefenentladung hätte verhindert werden können. Dazu wird der

Ladezustand der Akkus in % für RAGMAR's Energieeinsparung und der möglichen Energieeinsparung simuliert:

Als Datengrundlage dienen die Stromflüsse vom Akku zum Motor und vom Spannungswandler des PV-Moduls zum Akku. Betrachtet wird der Zeitraum vom 08.10.2021 bis zum 21.11.2021, in dem es zur Tiefenentladung kam.

Als Maß für die in den Akku täglich hinzugefügte Ladungsmenge in Ah, wird die Differenz aus fließender Ladungsmenge zum Akku pro Tag und fließender Ladungsmenge zum Motor pro Tag gewählt. Dadurch werden Elektronik- und Speicherverluste nicht beachtet. Unter der Annahme, dass Elektronik- und Speicherverluste täglich in etwa konstant sind, können diese aber aufgrund der prozentualen Darstellung auch vernachlässigt werden.

Zum Startpunkt 08.10.2021 wird die sich im Akku befindende Menge Ladung = 0 Ah gesetzt. Durch Addition der sich am Tag zuvor befindenden Ladungsmenge im Akku mit der täglich hinzugefügten Ladungsmenge, kann die Ladungsmenge ermittelt werden, die sich pro Tag im Akku befindet. Das Ergebnis ist eine Darstellung absoluter Ladungsmengen in des Akkus, deren Verlauf sich proportional zur gelben Funktion von Abbildung 31 verhält.

Für den Ladezustand 100 % des Akkus, wird die maximale Ladungsmenge im Akku während des Betrachtungszeitraums festgelegt, für den Ladezustand 0 % die minimale Ladungsmenge. Es ergibt sich die gelbe Funktion des Ladezustands des Akkus der PVF X (vgl. Abbildung 31).

Es ist für jeden Tag des Betrachtungszeitraums bereits bekannt, wie viel Energie prozentual eingespart werden kann (vgl. Anhang 34). Durch Multiplikation der Ladungsmenge zum Akku pro Tag mit der prozentual eingesparten Menge Energie pro Tag, ergibt sich die eingesparte Ladungsmenge pro Tag. Die prozentuale Einsparung der Trackingenergie kann in diesem Fall problemlos mit der Ladungsmenge verrechnet werden, da in der Tagesauswertung die Ladungsmenge in Ah mit dem konstanten Faktor 24 V in eine Energie umgerechnet wurde. Damit ist die Ladungsmenge proportional zur Energie und prozentuale Angaben sowohl mit der Ladung als auch mit der Energie verrechenbar. Es wird der Faktor aus prozentualer Einsparung und der Ladungsmenge zum Akku, und nicht der Ladungsmenge zum Motor gebildet, da bei der prozentualen Ausgleichsfunktion von Abbildung 30 auch als Bezug die Ladungsmenge zum Akku gewählt wurde.

Durch tägliche Subtraktion der eingesparten Ladungsmenge pro Tag von der Ladungsmenge zum Motor, ergibt sich eine verringerte Ladungsmenge, die fürs Tracking aufgewendet wird. Weiter wird nach dem gleichen Prinzip wie zur Ermittlung des Ladezustands des Akkus vorgegangen: Die täglich hinzugefügte Ladungsmenge zum Akku ist die Differenz aus Ladungsmenge zum Akku und der neu errechneten Ladungsmenge zum Motor und durch Addition der täglich hinzugefügten Ladungsmenge zur Ladungsmenge am Tag zuvor, ergibt sich die absolute Ladungsmenge in dem Akku, die in Form von prozentualer Darstellung in Abbildung 31 dargestellt ist.

Man erkennt, dass beide vct-Steuerungen, mit und ohne Deaktivierung der Nachtpositionsstellung, eine Tiefenentladung der Akkus sicher verhindern würden und darüber hinaus trotz niedrigster Bestrahlungstagesummen, der Ladezustand weiterhin nahe 100 % bleibt.

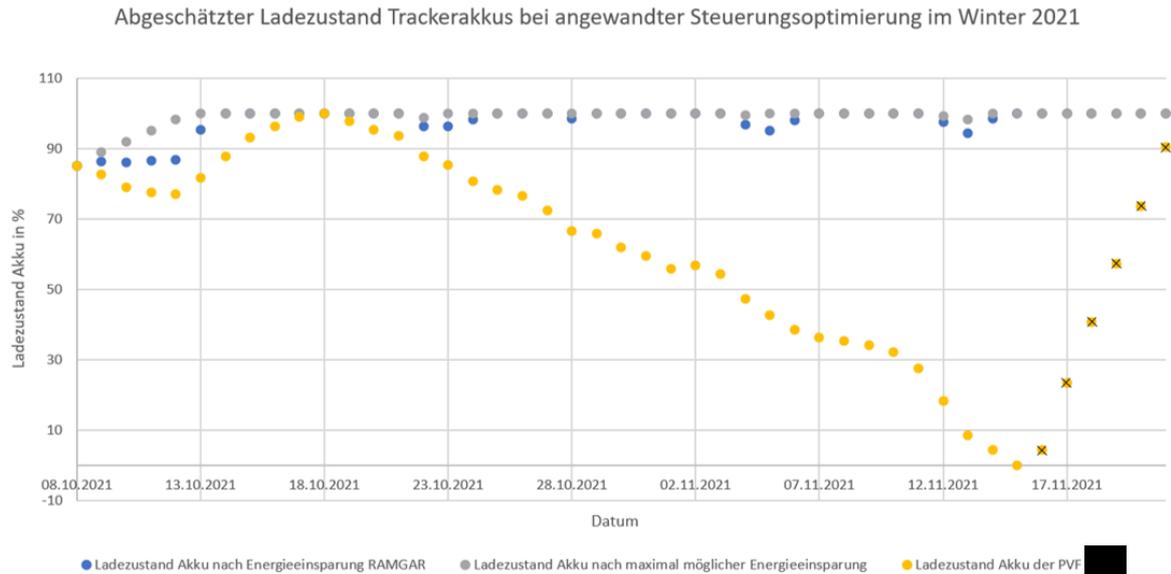


Abbildung 31 Abgeschätzter Ladezustand Trackerakkus bei angewandter Steuerungsoptimierung im Winter 2021. Der Ladezustand der Akkus auf der y-Achse ist in Abhängigkeit vom Datum auf der x-Achse in Form einer Modellrechnung ausgedrückt. Die gelbe Funktion beschreibt den realen Ladezustand der Akkus der PVF X. Die blaue Funktion den Ladezustand der Akkus, wenn eine vct-Steuerung auf die PVF X angewendet werden würde und die Nachtpositionsstellung aktiviert bleiben würde. Die graue Funktion beschreibt den Ladezustand der Akkus inklusive Deaktivierung der Nachtpositionsstellung. Der Startpunkt des Ladezustands aller Funktionen ist am 08.10.2021 der gleiche und liegt bei 85 %. Am 18.10.2021 wird der maximale Ladezustand der Akkus der PVF X von 100 % erreicht, die Akkuspannung beträgt circa 24 V. Nach dem 15.11.2021 scheint sich laut Modelldarstellung der Ladezustand der Akkus wieder zu erholen, beschrieben durch die durchgestrichenen, gelben Punkte: Dies ist falsch, da zwar mehr Strom in zum Akku fließt, was im Diagramm dargestellt ist, sich allerdings die Akkuspannung nicht erhöht. Der Akku ist somit tiefenentladen (eigenes Diagramm).

5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswirkungen der Fehlerquellen dieser Arbeit werden diskutiert, auf weiterführende Aspekte eingegangen und die Ergebnisse in den globalen Kontext eingeordnet.

Es muss bewiesen werden, dass trotz der Fehler von Kapitel 3.1 die Auswertungen der Tagesmessergebnisse des Mehrertrags aussagekräftig genug sind, da eine selbstgebaute Sensorstation als Auswertungsgrundlage dient. Durch die Vor-Ort-Kalibrierung von Kapitel 5.1 konnten die beschriebenen Fehler zum überwiegenden Teil ausgeglichen werden: Dadurch, dass in Abbildung 24 beispielsweise die Bestrahlungsstärken von RAGMAR und der PVF X im Vergleichszeitraum visuell nahezu exakt übereinstimmen, lässt sich der Erfolg der Kalibrierung beweisen. Durch die Größe „Mehrertrag vor Korrektur in %“ von Abbildung 25 kann eine Aussage der Genauigkeit der Kalibrierung getroffen werden: In Abbildung 25 beträgt die Abweichung beispielsweise 0,9 % zwischen den Messergebnissen RAMGAR's und der PVF X bei gleichen Neigungswinkeln. Durchschnittlich beträgt die Abweichung circa 2 % innerhalb der ersten Messperiode. Dieser resultierende Fehler wird

durch die nachfolgenden Korrekturrechnungen noch weiter minimiert, sodass die Aussagekraft der Tagesauswertungen des Mehrertrags gewährleistet ist.

Die Plausibilität der Aussagen lässt sich auch anhand der Messergebnisse überprüfen: In Abbildung 26 ist der gesamte Tagesverlauf der Vergleichsmessungen in 5-Minutenaufösung beschrieben, welcher sich unter anderem auf Basis der Einflussfaktoren aus Kapitel 2.2.2 erklären lässt. Zudem konnten die Einzelergebnisse zum Beispiel die des möglichen, kurzzeitigen Tagesmehrertrags, auch anhand der Literatur verifiziert werden.

Bei der Ermittlung der Tracking-Energieeinsparungen gilt der theoretische Fehler von 4° Unsicherheit von RAGMAR im Vergleich zur realen Position (vgl. Kapitel 3.1.3): Es werden nicht 7° angenommen, da nicht direkt mit den Neigungswinkeln der PVF X am Tag verglichen wird, sondern nur betrachtet wird, ob es in Summe Neigungswinkeleinsparungen zu konstant $\pm 46^\circ$ gab. In Anhang 13 beträgt die Abweichung zur PVF X circa 2° im Tagesverlauf, sodass die reale Abweichung vermutlich auch geringer ausfällt. Dieser Fehler fällt im Tagesverlauf prozentual größer aus als der Fehler der Bestrahlungsstärke.

Deutlich ungenauer sind die Hochrechnungsmodelle auf Basis stochastischer Abhängigkeiten der prozentualen Mehrerträge und Energieeinsparungen (vgl. Abbildung 28 und 30), weil geringe Datenmengen vorliegen und zwischen den jeweiligen Größen keine physikalische Abhängigkeit besteht. Bei den Mehrerträgen ist die Datenmenge noch wesentlich geringer als bei der Hochrechnung der Energieeinsparungen. Der Fehler bei der Ermittlung der Hochrechnungs-Mehrerträge ist deshalb so groß, weil die Einflussgröße der Jahreszeit unberücksichtigt bleibt: Zum einen sind im Winter laut Literatur an bewölkten Tagen noch deutlich größere Mehrerträge als prognostiziert zu erwarten, zum anderen sinkt im Winter die Tagessumme der Bestrahlung, wodurch die prognostizierten Mehrerträge zu hoch ausfallen sollten. Trotzdem konnte die Größenordnung des hochgerechneten Mehrertrags mit Ergebnissen der Literatur verifiziert werden. Zu erwarten sind 1,39 bis 1,54 % Mehrertrag.

Das Ziel der Hochrechnung der Energieeinsparungen konnte laut Prognosemodell unbestritten erreicht werden: Abbildung 31 zeigt, dass eine Tiefenentladung bei einer Anwendung der vct-Steuerung auf die PVF X definitiv hätte verhindert werden können. Natürlich können ungünstige Verteilungen zwischen Direkt- und Diffusstrahlung das Modell von Abbildung 31 auch negativ verändern, aber fast einen Monat lang ungünstige Verteilungen sind sehr unwahrscheinlich.

Auch das Ziel einer Ertragsoptimierung wird durch eine Steuerungsanpassung erreicht werden.

Bei einem resultierenden, hochgerechneten Mehrertrag von 606 bis 673 MWh/a ist eine Umsetzung der vct-Steuerung auf die PVF X sehr zu empfehlen, vor allem auch aufgrund der erhöhten Systemsicherheit durch die Verhinderung der Tiefenentladung der Trackerakkus. Die Investitionskosten würden im Vergleich zum Mehrertrag voraussichtlich vernachlässigbar gering ausfallen, da es sich hauptsächlich um eine Softwareanpassung handelt. Selbst wenn sich der hochgerechnete Mehrertrag aufgrund von Hochrechnungsfehlern beispielsweise halbieren würde, würde dies nichts am Erfolg der Steuerung ändern.

Die negativen Folgen von Schneefall, Pyrometerausfällen und Modulverunreinigungen bei einer pauschalen Umsetzung der vct-Steuerung können alle durch bereits vorhandene Sensoren verhindert beziehungsweise stark minimiert werden, wie in Anhang 24 beschrieben.

Nicht betrachtet wurde in dieser Arbeit der Einfluss der bifazialen Module auf ein optimiertes Diffuslichtverhalten bei Ost/West-Trackern. Dieser Einfluss bewirkt im Vergleich zu monofazialen Modulen eine Ertragssteigerung (Rodríguez-Gallegos et al. 2020: 1476). Zusätzlich zu den bekannten

Einflussgrößen ist diese Ertragssteigerung abhängig vom Albedo Effekt: Je mehr Strahlung vom Boden reflektiert wird, desto größer ist der Diffuslichtertrag (Pelaez et al. 2019: 719). Für Seattle, einem Ort mit viel Diffusstrahlung im Jahresverlauf, beträgt der jährliche Mehrertrag durch ein optimiertes Diffuslichtverhalten in Abhängigkeit vom Albedo Effekt bei Ost/West-Trackern 0,8 bis 1,3 % (Pelaez et al. 2019: 719). Zudem vergrößert sich der Mehrertrag einer diffuslichtoptimierten Steuerung mit steigendem Breitengrad (Rodríguez-Gallegos et al. 2020: 1476). Der Breitengrad von Seattle beträgt $47,6^\circ$ (vgl. Google Earth Pro 2022). Für den Breitengrad der PVF X von $56,7^\circ$ bei bifazialen Modulen und Ost/West-Trackern wurde ein Mehrertrag von circa 1,4 % simuliert (Rodríguez-Gallegos et al. 2020: 1476).

Bei einer Einordnung der Ergebnisse in einen globalen Kontext, ist die vct-Steuerung immer als Verbesserung einer astronomischen Steuerung zu empfehlen. Für Stand-Alone-Systeme bietet sie eine gute Möglichkeit, unter Einsparung von Stand-Alone-PV-Modulen und Akkukapazität die Investitionskosten eines Parks zu senken und zusätzlich den Ertrag des Parks zu erhöhen.

Werden Trackingsysteme mit Netzanschluss betrachtet, kann die vct-Steuerung als Verbesserung einer astronomischen Steuerung genutzt werden, jedoch handelt es sich hierbei um keine Optimierung zwischen den Größen der aufgewendeten Trackingenergie und dem Mehrertrag. Bei einer solchen Systemoptimierung sind Vorhersagealgorithmen, wie der von Gulin et al. (2013: 429) zu empfehlen. Vorhersagemodelle bieten auch eine Chance zur weiteren Optimierung der vct-Steuerung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Neben einem Know-how Gewinn über Trackingsysteme verfolgt diese Arbeit das Ziel, das Diffuslichtverhalten der Ost/West-Trackersteuerung der PVF X in Dänemark zu optimieren. Es soll eine Optimierung der Tracker-Energieeinsparungen und eine Erzielung von Mehrertrag an bewölkten Tagen erreicht werden. Dabei hat das Ziel der Tracker-Energieeinsparungen Vorrang, um eine erneute Tiefenentladung der Akkus wie im Winter 2021 möglichst zu verhindern.

Mit Hilfe einiger Grundlagen wird das technische Fachwissen erläutert, das für die weiteren Kapitel der Arbeit notwendig ist. Allgemeines Wissen von PVFs im Allgemeinen sowie dem speziellen Aufbau der PVF X wird beispielsweise benötigt, um die Beziehung zwischen Mehrertrag der Bestrahlungsstärke und Anlagenmehrertrag nachvollziehen zu können. Fachwissen über Grundprinzipien, Einflussgrößen und bereits bekannte Steuerungen des Trackings sind notwendig, um daraus eine spezifische Steuerung für die PVF X entwickeln zu können. Da eine astronomische Steuerung verbessert wird, liegt ein besonderer Fokus auf dem Verständnis dieser Steuerung, gerade weil sie auch für den Praxistest mit RAGMAR nachgebaut werden musste.

Für die Auswertung des Praxistests wurden Daten von RAGMAR und der PVF X verwendet. Um die spätere Rechnung nachvollziehen und beurteilen zu können, muss die genaue Quelle der Daten bekannt sein, auf der die Rechnungen basieren. Da eine selbstgebaute Sensorstation benutzt wurde, ist es auch wichtig, die Messfehler zu ermitteln, um die Genauigkeit der Ergebnisse einschätzen zu können. Für den Neigungswinkel kann eine Messunsicherheit von 4° zur Auswertung der Tracker-Energieeinsparungen angenommen werden. Die Messunsicherheit der Beleuchtungsstärke ist unter anderem von den Messunsicherheiten des Neigungswinkels und der Zeit abhängig. Der Fehler zur Ermittlung des Mehrertrags ist weitaus größer und vielfältiger. Dieser wurde unter anderem durch eine Vor-Ort-Kalibrierung ausgeglichen, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Trackerbewegungen der PVF X wurden genau betrachtet. Die Tracker-Energieverbräuche wurden als Basis zur Errechnung der Tracker-Energieeinsparungen analysiert. Eigene Messungen zur Untersuchung einer optimierten Trackerstellung bei Diffuslicht zeigen, dass sich der optimale Neigungswinkel grundsätzlich nahe 0° befindet, aber in Abhängigkeit von der Wolkendecke stark variiert. Die Abweichung von 0° bewegt sich dabei tendenziell in Richtung der verdeckten Sonne. Für die Umsetzung in Form einer Steuerung kann ein Bestrahlungsstärkengrenzwert verwendet werden. Wenn dieser unterschritten wird, erbringt die 0° Position mehr Ertrag als die astronomische Trackingposition. Dieser Grenzwert ist abhängig von der Tages- und Jahreszeit.

Aus den erlangten Erkenntnissen wurde die vct-Steuerung als Verbesserung der astronomischen Steuerung der PVF X entwickelt. Sie basiert auf einer Deaktivierung der astronomischen Steuerung während der Zeit der Grenzwertunterschreitung, wenn sich der Tracker von 0° wegbewegt. Während dieser Zeit dreht der Tracker nicht auf 0° , sondern bleibt auf der Position der Grenzwertunterschreitung stehen. Bewegt sich der Tracker in Richtung 0° , erfolgt keine Deaktivierung der astronomischen Steuerung bei Grenzwertunterschreitung. Daraus folgt, dass die vct-Steuerung den Tracker um entweder genauso viel oder weniger Grad dreht und dadurch niemals mehr Energie verbraucht als die bisherige Steuerung. Es ist möglich, die vct-Steuerung durch eine Wetterprognose und akkuspannungsabhängige Steuerung weiter zu verbessern.

Um sowohl den Jahresmehrertrag der Steuerung abschätzen zu können als auch verifizieren zu können, ob eine Tiefentladung der Akkus hätte verhindert werden können, wurde die vct-Steuerung mit Hilfe von RAGMAR in X im Juni und Juli 2022 getestet. Durch eine Vor-Ort-Kalibrierung und weitere rechnerische Korrekturen wurden die bekannten Messfehler soweit ausgeglichen, dass ein aussagekräftiges Ergebnis entstanden ist. Die Auswertung gliedert sich in die jeweiligen Tagesauswertungen der Messperiode, in eine Gesamtdarstellung der Messergebnisse und eine Jahreshochrechnung.

Die Tracker-Energieeinsparungen wurden anhand einer 27-Tagesmessperiode bestimmt. Wenn unabhängig von der Verbesserung des Diffuslichtverhaltens auch das theoretisch vermeidbare Fahren auf die Nachtposition eingespart werden würde, könnte man jeden Tag circa 12 % des Energieverbrauchs einsparen. Maximal können laut Modell 61,28 % Trackerenergie eingespart werden, da die Elektronik- und Speicherverluste im Mittel 38,72 % des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen. Der Ladezustand der PVF X wurde für den Winter 2021 simuliert, als es dort eine Tiefentladung der Akkus gegeben hat. Die Simulation zeigt, dass unter Anwendung der vct-Steuerung eine Tiefentladung der Akkus hätte verhindert werden können.

Der Mehrertrag wurde anhand einer 9-Tagesmessperiode bestimmt. An einem bewölkten Tag kann der kurzzeitige Mehrertrag der vct-Steuerung bis zu 30 % im Vergleich zur PVF X bei großer Neigungswinkeldifferenz betragen. Maximal wurden bis zu 6,68 % Tagesmehrertrag der vct-Steuerung im Vergleich zur PVF X erzielt, minimal -0,15 %. Verluste der vct-Steuerung entstehen morgens und abends, da das Horizontleuchten schlechter eingefangen werden kann und während der Umschwenkzeit des Trackers. Die gemessenen -0,15 % sind aber wahrscheinlich zum größten Teil durch den noch nicht optimal gewählten Grenzwert und Messfehler zu Stande gekommen, sodass negative Erträge bei einer Umsetzung der vct-Steuerung auf die PVF X vernachlässigbar sind. Die Jahreshochrechnung des Mehrertrags fällt aufgrund der geringen Datenmenge, keiner physikalischen Abhängigkeit der verwendeten Größen und der Vernachlässigung der Jahreszeitabhängigkeit sehr ungenau aus. Aufgrund geringerer Bestrahlungstagesummen entstehen durch das Prognosemodell im Winter deutlich größere prozentuale Mehrerträge. Es ergibt sich ein Jahresmehrertrag von 1,39 bis 1,54 %, abhängig von der verwendeten Ausgleichsfunktion, was einem absoluten Anlagenmehrertrag von 606 bis 673 MWh/a

entspricht. Viele Ergebnisse können mit der Literatur belegt werden, gravierende Abweichungen gibt es nicht.

Bifaziale Module haben ebenfalls einen Einfluss auf den Mehrertrag der vct-Steuerung, der mit Hilfe von RAGMAR nicht festgestellt werden konnte. Für einen Ort mit viel Diffusstrahlung ist in Abhängigkeit des Albedo-Effekts mit 0,8 bis 1,4 % Mehrertrag zu rechnen.

Auch wenn der absolute Anlagenmehrertrag geringer ausfallen würde als prognostiziert, würde sich eine Umsetzung der vct-Steuerung auf die PVF X trotzdem lohnen: Die Systemstabilität steigt durch Verhinderung der Tiefenentladung der Akkus und ein Mehrertrag ist erzielbar, der unabhängig vom Prognosefehler die Investitionskosten um ein Vielfaches decken sollte.

Bei einer globalen Einordnung ist die vct-Steuerung immer als Verbesserung der astronomischen Steuerung zu empfehlen und bei Stand-Alone-Trackern besonders sinnvoll einzusetzen, beispielsweise zur Einsparung von Akkukapazität. Da bei Trackern mit Netzanschluss der Aspekt der Systemsicherheit bereits gewährleistet ist, sind andere Algorithmen zur Steuerung womöglich besser geeignet, die beispielsweise das Fahren zur 0 ° Position bei Grenzwertunterschreitung bewirken, die Bestrahlung vorhersagen können oder durch künstliche Intelligenz steuern. Diese Algorithmen müssten dann mit der vct-Steuerung verglichen werden.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass eine Umsetzung der vct-Steuerung auf der PVF X empfohlen werden kann. Dazu ist im nächsten Schritt die Entscheidung aller beteiligter Parteien nötig. Zur tages- und jahreszeitlichen Grenzwertermittlung müssen die Pyranometerdaten am besten über ein Jahr vorliegen oder alternativ interpoliert beziehungsweise simuliert werden. Es wird empfohlen, zusätzlich zu den bestehenden Pyranometern noch ein oder zwei weitere, horizontal ausgerichtete Pyranometer zu installieren, um eine Ausfallsicherheit zu gewährleisten. Die vct-Steuerung von Anhang 24 sollte unter Berücksichtigung des Reinigungseffekts der Module, möglicher Pyranometerausfälle und Schneefall von den Trackerherstellern für 5 Trackerreihen in einer kurzen Testphase umgesetzt werden, in der mögliche Umsetzungsfehler der Steuerung erkannt werden können. Anschließend sollte die Umsetzung auf den ganzen Park bis auf 3 Trackerreihen folgen, die als Referenz dienen, um den tatsächlichen Mehrertrag und die Tracker-Energieeinsparung ermitteln zu können.

Literaturverzeichnis

AL-Rousan, Nadia, Nor Ashidi Mat Isa und Mohd Khairunaz Mat Desa (2018): Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review, [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117313266> [23.08.2022].

Analog Devices (2009): ADXL335 Datasheet, [online] <https://www.robotpark.com/image/data/PRO/91423/adxl335.pdf> [23.08.2022].

Arduino (2022): Arduino Documentation – Arduino Due, [online] <https://docs.arduino.cc/hardware/duo> [23.08.2022].

Bahrami, Arian, Chiemeka Onyeka Okoye und Ugur Atikol (2016): The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa, [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916307085#:~:text=The%20results%20show%20that%20the,from%200.42%25%20to%2023.4%25> [23.08.2022].

CATALEX (2013): Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino, [online] <http://datalogger.pbworks.com/w/file/attach/89507207/Datalogger%20-%20SD%20Memory%20Reader%20Datasheet.pdf> [23.08.2022].

Chaidoulis, Ioannis G. und Karanikolas, Nikitas (2020): A review of microprocessor based solar photovoltaic tracking systems, [online] <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3437120.3437280> [23.08.2022].

Chang, Tian Pau (2009): Performance study on the east–west oriented single-axis tracked panel, [online] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360544209002680?token=ED76810FFA3D182AA3FA818B1F49B48D8714C8DDD3C022302C49A9E7C1F2E45914ABCE528C25D3BC964FDD2E99091021&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220729135410> [23.08.2022].

Claws (2018): BH1750 Library, [online] <https://github.com/claws/BH1750> [23.08.2022].

Cramer, G., B. Engel, F. Greizer, J. Laschinski, M. Meinhardt und M. Victor (2005): String-Technik in der Photovoltaik - Stand der Entwicklung und Ausblick, [online] https://www.elektro.net/file/show/79246/1c8e14/de_20_05_GT04.pdf [23.08.2022].

Dolora, Alberto, Francesco Grimaccia, Sonia Leva, Marco Mussetta, Roberto Faranda und Moris Gualdoni (2012): Performance Analysis of a Single-Axis Tracking PV System, [online] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6244832> [23.08.2022].

Effe, Martin (o. J.): Klimatabelle und Klima weltweit, [online] <https://www.klimatabelle.de/klima/klimatabelle-europa.htm> [23.08.2022].

Ewald, Wolfgang (2019): Wolles Elektronikliste - BH1750FVI (GY-30, 302) Lichtsensormodul, [online] <https://wolles-elektronikliste.de/bh1750fvi-lichtsensormodul#:~:text=Der%20BH1750FVI%20besitzt%20eine%20Fotodiode,über%20einen%20einstellbaren%20Messzeitraum%20integriert> [23.08.2022].

Fuentes-Morales, Rosa F., Arturo Diaz-Ponce, Manuel I.Peña-Cruz, Pedro M. Rodrigo, Luis M.Valentín-Coronado, Fernando Martell-Chavez und Carlos A. Pineda-Arellano (2020): Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review, [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20311300> [23.08.2022].

- Google Earth Pro (2022): Google Earth Pro Software, [online] <https://www.google.com/intl/de/earth/about/versions/> [23.08.2022].
- Gulin, Marko, Mario Vašak und Nedjeljko Perić (2013): Dynamical optimal positioning of a photovoltaic panel in all weather conditions, [online] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191300192X?casa_token=Vi70iB3br_YAAA:AAA:_Z95VqtbSrQGhOWWcv7A7Q66udiuYj7A_bPH07ciffw8pb3cXXKxTEdWOLW_U5igggVIdgCHxg [23.08.2022].
- Hammoumi, Aboubakr El, Saad Motahhir, Abdelaziz El Ghzizal und Aziz Derouich (2021): Advanced Technologies for Solar Photovoltaics Energy Systems, [online] <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-64565-6> [23.08.2022].
- Harten, Ulrich (2012): Physik – Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, [online] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-19979-0.pdf> [23.08.2022].
- Häberlin, Heinrich (2010): Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, [online] <https://www.vde-verlag.de/buecher/623205/photovoltaik.html> [23.08.2022].
- Heinze, Paul (1953): Prüfen und Instandhalten von Werkzeugen und anderen Betriebshilfsmitteln, [online] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-99844-7_3?noAccess=true [23.08.2022].
- Hezel, Rudolf und Glunz, Stefan (2003): Neue Silicium-Solarzellenstrukturen für höhere Wirkungsgrade, [online] https://www.hanser-https://opus4.kobv.de/opus4-htw/frontdoor/deliver/index/docId/196/file/2003_Photovoltaik+++Neue+Horizonte.pdf#page=79 [23.08.2022].
- Hoffmann, Torsten (2012): Sonnenverlauf, [online] <https://www.sonnenverlauf.de/#/53.6913,9.6686,18/2022.03.25/08:00/1/3> [23.08.2022].
- International Energy Agency (2022): Snapshot of Global PV Markets, [online] https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/04/IEA_PVPS_Snapshot_2022-vF.pdf [23.08.2022].
- Joachim Herz Stiftung (2022a): LEIFIphysik - Elektromagnetisches Spektrum, [online] <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/grundwissen/sichtbares-licht> [23.08.2022].
- Joachim Herz Stiftung (2022b): LEIFIphysik - Sonnenspektrum, [online] <https://www.leifiphysik.de/astronomie/sonne/grundwissen/sonnenspektrum> [23.08.2022].
- Kayri, Ismail und Gencoglu, Muhsin Tunay (2017): Prediction of Power Production from a Single Axis Photovoltaic System by Artificial Neural Networks, [online] https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7980417&casa_token=c4R5QVoLXNoAAAAA:jE3ftec6NmTR8E0QBalJKcJW3DBqeahHFYV16ikP5SAAZQB6RGhL7545xTvJA46jLRe36iA9Z-8&tag=1 [23.08.2022].
- Kelly, Nelson A. und Gibson, Thomas L. (2009): Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system, [online] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0038092X09001923?token=4F16E111F7FDCED03BF2E68E99C7854775212270995D69A5A904C809607BE22F026F4592212F242584356F432581C11F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220731101805> [23.08.2022].
- Kelly, Nelson A. und Gibson, Thomas L. (2011): Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days, [online]

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0038092X1000321X?token=A6686625E12550926FA3FA4E7568863AF1B18087EDDDFF73FD48D3616E67C47E717A2647997C0188D9F0A6EF02EF32A9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220815185520> [23.08.2022].

KIPP & ZONEN (2012): SMP10 Datasheet, [online] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjD7vHD0sD5AhX1_rsIHU_ZBNMQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.kippzonen.com%2FDownload%2F1063%2FDatasheet-CMP10-CMP11-SMP10-SMP11-pyranometers-EN&usg=AOvVawOI6XwfGq8XjocKcxhRw0OU [23.08.2022].

Konrad, Frank (2008): Planung von Photovoltaik-Anlagen – Grundlagen und Projektorientierung – 2. Auflage, [online] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-8348-9542-4.pdf> [23.08.2022].

Koscher, Raffael (2021): Photovoltaik-Freiflächenanlagen in der Raumplanung - Steuerungsansätze zwischen Energiewende und nachhaltiger Raumentwicklung, [online] https://web.archive.org/web/20210328082335id_/https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/17107/1/Koscher%20Raffael%20-%202021%20-%20Photovoltaik%20Freiflaechenanlagen%20in%20der%20Raumplanung.pdf [23.08.2022].

Malav, Sumant und Vadhera, Shelly (2015): Hardware Implementation of Solar Tracking System Using a Stepper Motor, [online] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7510065> [23.08.2022].

Maxim Integrated (2015): DS3231 Datasheet, [online] <https://www.digikey.de/de/datasheets/maxim-integrated/maxim-integrated-ds3231-ds3231s> [23.08.2022].

Mertens, Konrad (2022): Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, [online] <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446474291> [23.08.2022].

Mousazadeh, Hossein, Alireza Keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrinia und Ahmad Sharifi (2009): A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output, [online] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032109000318?token=65C6F77214E1D5910B5F6ABA25039619FE59E1EC9FF3E4432FADFCD38A9CEECE86E2D5212CBB7E9574FF89A7AB7D6AD5&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220730072552> [23.08.2022].

Neville, Richard C. (1978): Solar energy collector orientation and tracking mode, [online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X78901342> [23.08.2022].

Pelaez, Silvana Ayala, Chris Deline, Peter Greenberg, Joshua S. Stein und Raymond K. Kostuk (2019): Model and Validation of Single-Axis Tracking With Bifacial PV, [online] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8644027> [23.08.2022].

Pineda, Fabian und Arredondo, Carlos Andrés (2012): Design and implementation of sun tracker prototype for solar module positioning, [online] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6318194?casa_token=t-gE4O2hp_EAAAAA:hAx7IrHUfdefokXNfYORJyAsFz6tgGHbJqlW4x6X_pLvSHHF-2z-1_aQe_axCWLo_RWrsD7CLNQ [23.08.2022].

Quaschnig, Volker (2019): Regenerative Energiesysteme - Technologie – Berechnung – Klimaschutz, [online] <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446461147> [23.08.2022].

Quesada, Guillermo, Laura Guillon, Daniel R. Rouse, Mostafa Mehrtash, Yvan Dutil und Pierre-LucParadis (2015): Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes, [online]

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0196890415005828?token=03CF9BBF990CA3190FEAA98435F30BC6691AC10DCCCE0DE023AEDB4C8A64D9600DAE9A87FA59031E95F4BC02DAF09259&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220731091831> [23.08.2022].

Reda, I. und Andreas, A. (2008): Solar Position Algorithm (SPA), [online] <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/spa.html> [23.08.2022].

ROHM Semiconductor GmbH (2009): BH1750FVI Datasheet, [online] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/338083/ROHM/BH1750FVI.html> [23.08.2022].

Roth, P., A. Georgiev und H. Boudinov (2003): Design and construction of a system for sun-tracking, [online]

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960148103001964?token=623C77EAECC959F98A71A9158542D2658C01F6A994E2A6016A8F24FF352FACB485A55B017A230E415060E52F921A0499&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220731174205> [23.08.2022].

Rodríguez-Gallegos, Carlos D., Oktoviano Gandhi, S. K. Panda und Thomas Reindl (2020): On the PV Tracker Performance: Tracking the Sun Versus Tracking the Best Orientation, [online] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9139448> [23.08.2022].

Rubio, F.R., M.G. Ortega, F. Gordillo und M. López-Martínez (2007): Application of new control strategy for sun tracking, [online]

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0196890407000064?token=1CA18BA1B0E010E922AAC40F20828DF4991532AB00DB346CCB3FE0F04DE05D57983A8DD1881A395063425282B328B92E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220731093655> [23.08.2022].

Schöne, Armin (1997): Meßtechnik, [online] <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-642-60364-8%2F1> [23.08.2022].

Steffens, Elena (2018): Simulationen zur Ertragsoptimierung einer einachsigen nachgeführten Photovoltaikanlage, [online] https://reposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/9114/1/SteffensElena_geschwaerzt.pdf [23.08.2022].

STMicroelectronics N.V. (2002): ULN2003 Datasheet, [online] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/25575/STMICROELECTRONICS/ULN2003.html> [23.08.2022].

Sumathi, Vijayan, R. Jayapragash, Abhinav Bakshi und Praveen Kumar Akella (2017): Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade, [online]

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032117302162?token=8061F83CB9C2D78D4386E7D49FF2FD882293157C945862652D24CC70CC1F01B17ED8346A30D94AD830D454D8943BD332&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220729131326> [23.08.2022].

Texas Instruments (2019): TCA9548A Datasheet, [online] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf?ts=1660114266597> [23.08.2022].

Uni Stuttgart (2013): Mathematik-Online-Lexikon - Kugelkoordinaten, [online] <https://mo.mathematik.uni-stuttgart.de/inhalt/aussage/aussage441/> [23.08.2022].

Wang, Haonan, Thomas Stetz, Markus Kraiczky, Konrad Diwold, Sebastian Schmidt und Martin Braun (2015): ETG-Fachtagung 2015 ‘Von Smart Grid zu Smart Markets‘ - Zentrales Blindleistungsmanagement für die Netzverknüpfungspunkte Hochspannung/Mittelspannung der Bayernwerk AG, [online] https://www.researchgate.net/profile/Haonan-Wang-4/publication/305769912_Zentrales_Blindleistungsmanagement_fur_die_Netzverknuepfungspunkte_H

ochspannungMittelspannung_der_Bayernwerk_AG/links/57a07db808ae94f454eb0adf/Zentrales-Blindleistungsmanagement-fuer-die-Netzverknuepfungspunkte-Hochspannung-Mittelspannung-der-Bayernwerk-AG.pdf [23.08.2022].

Wang, Peter Grunnet, Mikael Scharling, Kristian Pagh Nielsen, Kim Bjarne Wittchen und Claus Kern-Hansen (2013): Technical Report 13-19 - 2001– 2010 Danish Design Reference Year - Reference Climate Dataset for Technical Dimensioning in Building, Construction and other Sectors, [online] https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/TR/2013/TR13-19.pdf [23.08.2022].

Zulkafli, R., A. Bawazir, N. Amin, M. Hashim, M. Majid und N. Nasir (2018): Dual Axis Solar Tracking System in Perlis, Malaysia, [online] <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/3999/2874> [23.08.2022].

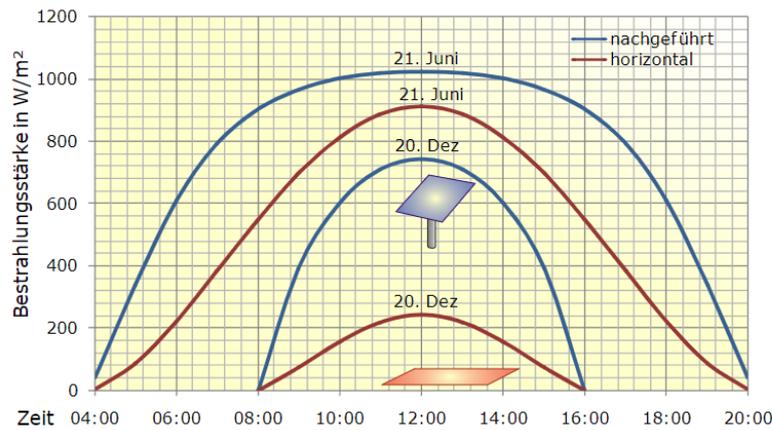
Anhang

Anhangsverzeichnis

Anhang 1 Mehrertrag einer zweiachsigen Nachführung	III
Anhang 2 Karte theoretischer Mehrerträge zweiachsiges Tracking in Europa.....	III
Anhang 3 Flussdiagramm Beispiel astronomische Steuerung.....	IV
Anhang 4 Aufbaumöglichkeiten Sensorsteuerung.....	IV
Anhang 5 Flussdiagramm Beispiel Sensorsteuerung.....	V
Anhang 6 Die hellste Stelle im Wolkenhimmel.....	V
Anhang 7 Grenzwert Tracking in Abhängigkeit von Datum und Uhrzeit.....	VI
Anhang 8 Berechnung des Sonnenstands nach DIN-Algorithmus.....	VI
Anhang 9 Beispiel einer Trackerreihe der PVF X.....	VII
Anhang 10 Aufbau und Funktionsweise RAMGAR's.....	VIII
Anhang 11 Blockschaltplan RAGMAR.....	IX
Anhang 12 Berechnung Messunsicherheit Echtzeituhr	X
Anhang 13 Überprüfung Neigungswinkel RAGMAR und PVF X.....	XI
Anhang 14 Mess-Spektrum von RAGMAR's Umgebungslichtsensoren.....	XI
Anhang 15 Spektrum der Sonne.....	XII
Anhang 16 Temperaturabhängigkeit Umgebungslichtsensor.....	XII
Anhang 17 Azimutabweichung RAGMAR zur PVF X: Einstrahlungsvergleich.....	XIII
Anhang 18 Auszug Datenblatt Pyranometer der PVF X.....	XIV
Anhang 19 Abweichung der trackenden Pyranometer der PVF X untereinander.....	XIV
Anhang 20 Auszug Ertragsgutachten der PVF X.....	XV
Anhang 21 Abweichungen der Trackerneigungswinkel der PVF X untereinander.....	XV
Anhang 22 RAGMAR's Sensorsteuerung bei bedecktem Himmel.....	XVI
Anhang 23 Sensorsteuerung an einem vereinzelt bewölkten Tag.....	XVI
Anhang 24 vct-Steuerung bei Umsetzung auf die PVF X.....	XVII
Anhang 25 Vorkalibrierung RAGMAR's Nord- und Süd-Sensor für Azimutkorrektur.....	XVIII
Anhang 26 Temperaturkorrektur der PVF X.....	XIX
Anhang 27 Vorkalibrierte Bestrahlungsstärken zur Azimutkorrektur.....	XIX
Anhang 28 Zeitabhängige Faktoren für Nord- und Südsensor zur Azimutkorrektur.....	XX
Anhang 29 Endgültige Kalibrierung RAGMAR's.....	XX
Anhang 30 Mehrertrag RAGMAR im Vergleich zur PVF X bei Direktstrahlung.....	XXI

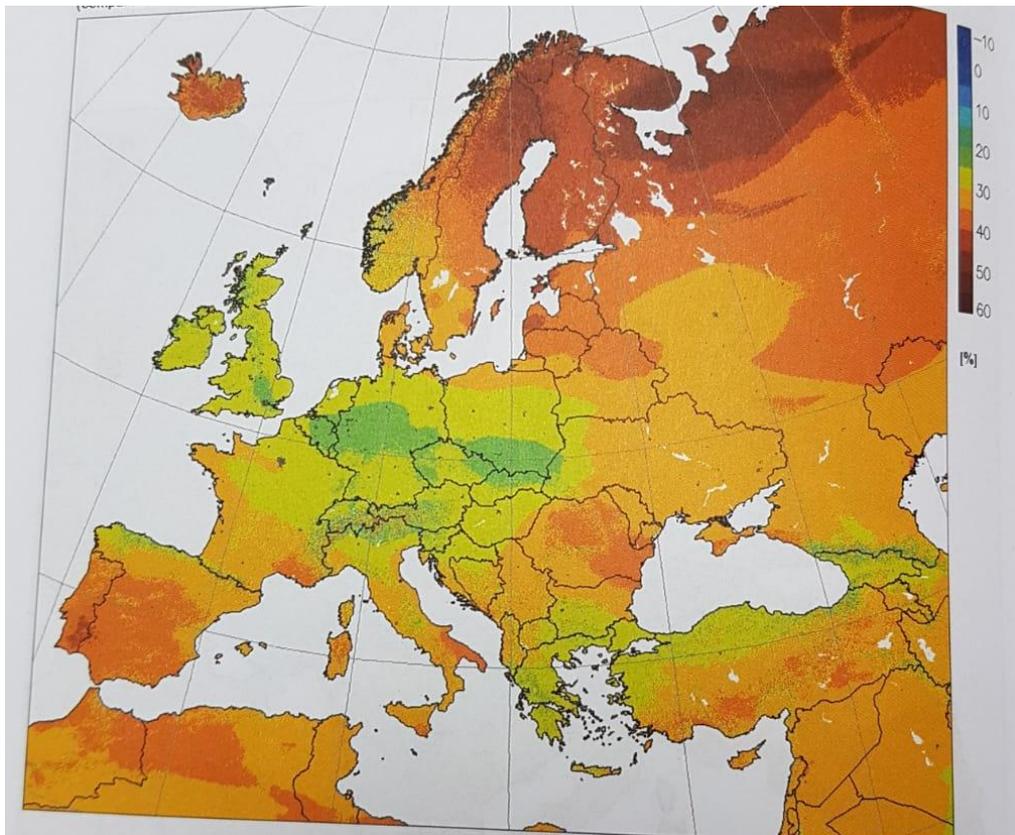
Anhang 31 Auswertung der 1. und fehlerbehafteten 2. Messperiode: Mehrertrag	XXII
Anhang 32 Jahresprognose der Mehrerträge der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X.....	XXIII
Anhang 33 Ausgleichsfunktion zwischen Bestrahlungstagesummen und Wechselrichtererträgen bei PR = 100 % der PVF X.....	XXIV
Anhang 34 Jahresprognose der Energieeinsparungen der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X.....	XXV
Anhang 35 Monatsprognose der Mehrerträge der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X.....	XXV

Anhang 1 Mehrertrag einer zweiachsigen Nachführung



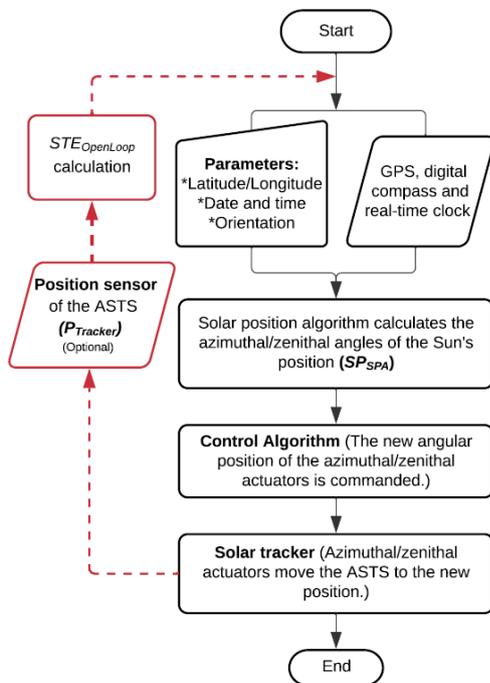
Die Bestrahlungsstärke ist für ein zweiachsig nachgeführtes PV-Modul und ein horizontal ausgerichtetes Modul in Abhängigkeit von der Uhrzeit am 21.06. und 20.12. an wolkenlosen Tagen auf dem 50. Breitengrad dargestellt. Im Winter kann bei einem nachgeführten System an einem Tag mehr als 300 % mehr Bestrahlungsstärke gemessen werden im Vergleich zur horizontalen Ausrichtung. Im Sommer sind es circa 50 % (Quaschnig 2019: 90).

Anhang 2 Karte theoretischer Mehrerträge zweiachsiges Tracking in Europa



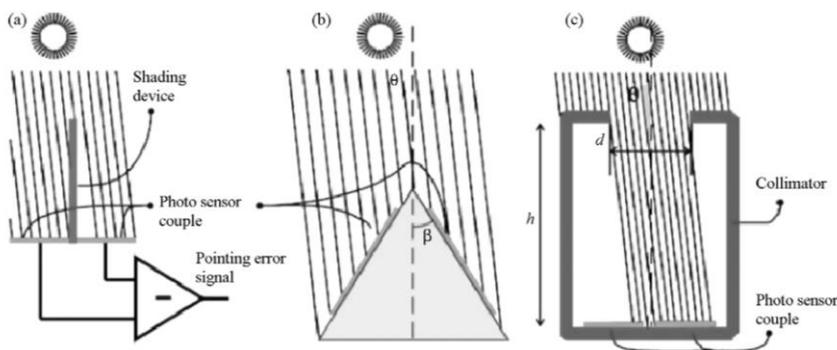
Der prozentuale Mehrertrag bei zweiachsiger Nachführung ist im Vergleich zu einer optimal orientierten, fest montierten PV-Anlage in Form einer Farbskala für Europa dargestellt (Häberlin 2010: 688).

Anhang 3 Flussdiagramm Beispiel astronomische Steuerung



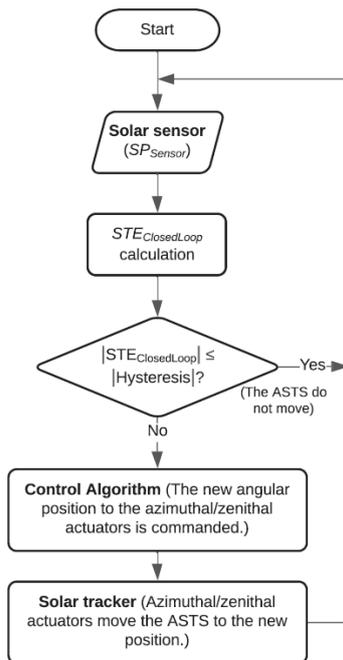
Nach Ermittlung der notwendigen Daten Standort, Uhrzeit und Datum berechnet ein Algorithmus den Sonnenstand und die zugehörige, optimale Ausrichtung des Trackers, das heißt den Neigungswinkel. Ein Motor wird angetrieben, der den Tracker zum ermittelten Neigungswinkel dreht. Der Neigungswinkel kann durch einen Sensor zum Beispiel durch ein Accelerometer ermittelt werden. SP_{SPA} = aktuelle Sonnenposition; STE = Trackingfehler; ASTS = aktives, solares Trackingsystem; $P_{Tracker}$ = Trackerposition (Fuentes-Morales et al. 2020: 207).

Anhang 4 Aufbaumöglichkeiten Sensorsteuerung



3 Beispiele für einen möglichen Aufbau einer Sensorsteuerung sind abgebildet: In a) wird eine Trennwand zwischen zwei LDRs aufgebaut. Wandert die Sonne im Bild nach links, bewirkt dies eine Verschattung des rechten LDR. Der Tracker wird nach links nachgestellt, bis die Verschattung verschwindet. In b) wird keine Verschattung verursacht, sondern die Signale der Sensoren der geneigten Flächen verglichen: Gerade befindet sich die Sonne auf der linken Seite, das heißt der linke Sensor misst eine größere Bestrahlungsstärke als der rechte und der Tracker wird in Richtung des größeren Wertes nachjustiert, das heißt nach links. c) arbeitet wie a) durch eine Verschattung der Sensoren, jedoch wird diese nicht durch eine Trennwand, sondern einen Hohlzylinder verursacht, in dem sich LDRs befinden (Mousazadeh et al. 2009: 1807).

Anhang 5 Flussdiagramm Beispiel Sensorsteuerung



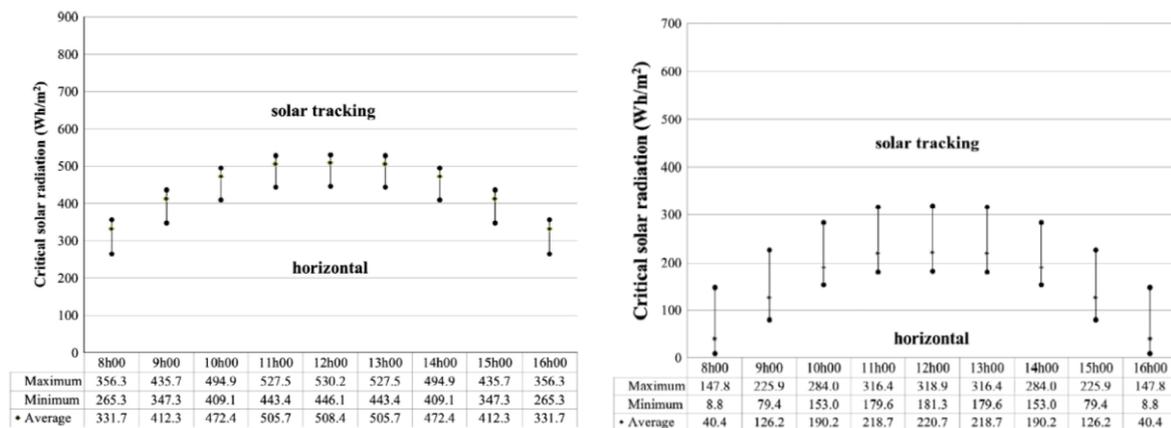
Nach Setzen einer Initialisierungsposition, die morgens einer maximalen Ostneigung entspricht, wird mit Hilfe von Sensoren die Bestrahlungsstärke gemessen. Beispielsweise ist ein Sensor nach Osten ausgerichtet und ein anderer nach Westen. Wenn der Westsensor eine größere Bestrahlungsstärke misst als der Ostsensor und diese über einem festgelegten Grenzwert der zulässigen Abweichung liegt, fährt der Steuerungsalgorithmus den Tracker so lange nach Westen, bis die Messwerte beider Sensoren wieder gleich sind, oder es wird ein anderer Trackingalgorithmus aktiviert. SP_{Sensor} = durch einen Sensor ermittelte Sonnenposition; STE = Trackingfehler; ASTS = aktives, solares Trackingsystem (Fuentes-Morales et al. 2020: 209).

Anhang 6 Die hellste Stelle im Wolkenhimmel



In einem Wolkenhimmel können viele helle Stellen auftreten (Pineda/Arredondo 2012: 2905)

Anhang 7 Grenzwert Tracking in Abhängigkeit von Datum und Uhrzeit



Der Grenzwert für zweiachsiges Trackings wurde für Montreal im Sommer (links) und im Winter (rechts) simuliert. Unterhalb des ermittelten Grenzwertes ist Tracking kontraproduktiv. Der Grenzwert ist zur Mittagszeit am größten und im Sommer größer als im Winter. Außerdem ist die Streuung des Grenzwertes im Winter größer als im Sommer (Quesada et al. 2015: 151).

Anhang 8 Berechnung des Sonnenstands nach DIN-Algorithmus

$$J' = 360^\circ \cdot \frac{\text{Tag des Jahres}}{\text{Zahl der Tage im Jahr}}$$

$$\delta(J') = \{0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J'+9,1^\circ) - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot J'+5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J'+26^\circ)\}^\circ$$

$$Zgl(J') = \{0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J'+85,9^\circ) + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J'+108,9^\circ) + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J'+105,2^\circ)\} \text{ min}$$

$$MOZ = LZ - \text{Zeitzone} + 4 \cdot \lambda \cdot \text{min}/^\circ$$

$$WOZ = MOZ + Zgl$$

$$\gamma_s = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta)$$

$$\alpha_s = \begin{cases} 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} & \text{für } WOZ \leq 12:00 \text{ h} \\ 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} & \text{für } WOZ > 12:00 \text{ h} \end{cases}$$

Der Standort des Trackers wird beschrieben durch die geografische Breite φ und geografische Länge λ . Die Zeit wird anhand der lokalen Zeit LZ ermittelt und in der Zeiteinheit WOZ, der wahren Ortszeit, vereinheitlicht, da es Unterschiede zwischen Sommer- und Winterzeit, der jeweiligen Zeitzone und der Sonnendeklination δ , dem jahreszeitlich abhängigen Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und Himmelsäquator gibt. Die weiteren Größen sind: J' = Parameter; Zgl = Zeitgleichung; MOZ = Mittlere Ortszeit; γ_s = Sonnenelevation; α_s = Sonnenazimut (Quaschnig 2019: 83.f).

Anhang 9 Beispiel einer Trackerreihe der PVF X



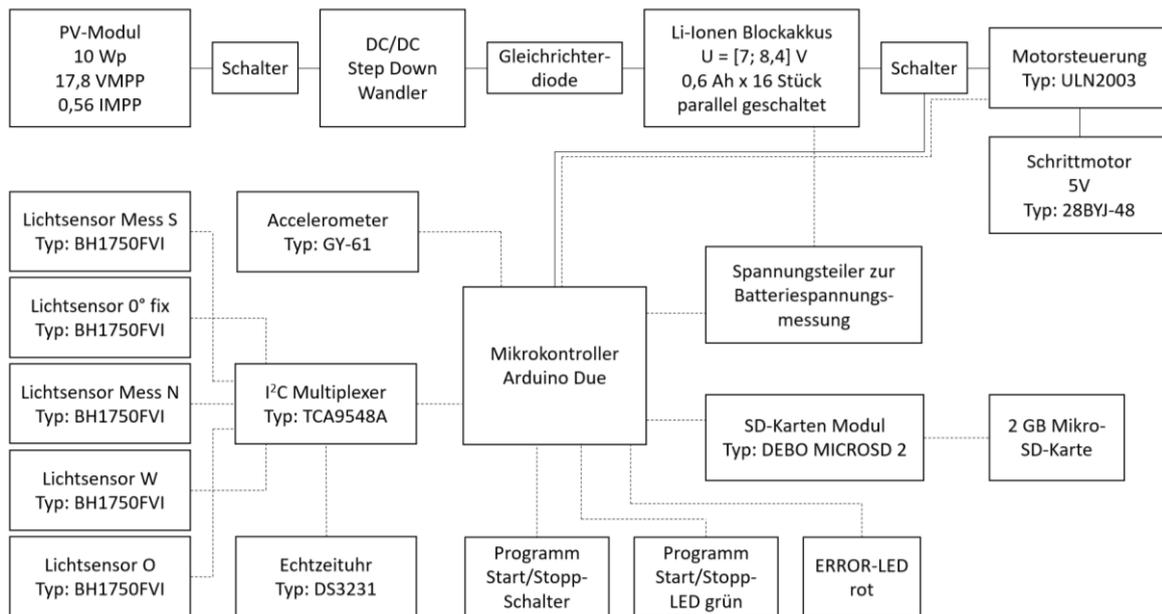
Die Module der Trackerreihe sind an einer Trackerachse befestigt, die in Nord/Süd-Richtung verläuft. Die Module drehen in Ost/West-Richtung, angetrieben durch einen Motor in der Mitte des Trackers, der die Achse mit der Länge von bis zu 78 m bewegt. Stützpfiler sind in regelmäßigen Abständen angebracht und durch Lager mit der Trackingachse verbunden. Das Foto wurde am 30.05.2022 in der PVF X aufgenommen (eigenes Foto).

Anhang 10 Aufbau und Funktionsweise RAMGAR's



Zu sehen ist die selbstgebaute, ost/west-trackende und programmierbare Sensorstation RAMGAR. Dessen Elektronik ist untergebracht in der großen Plastikbox. Ein Motor mit Zahnradübertragung befindet sich unter dem Plastikdach. Dieser verstellt die horizontale Trackerachse (nicht zu sehen), an der die gekippte Holzkonstruktion befestigt ist. Darauf befinden sich in Form weißer Halbkugeln 4 Umgebungslichtsensoren: Die Umgebungslichtsensoren Nord und Süd (LMN und LMS) messen in der Haupt-Trackingebene. Die West- und Ostsensoren (LW und LO) befinden sich auf dem jeweils um 45 ° von der Haupt-Trackingebene in ihre jeweilige Himmelsrichtung geneigten Holzstück. Die Beschriftung der Sensoren auf dem Holz RAMGAR's mit Edding ist im Foto zu erahnen. Der 5. Lichtsensor ist nicht zu erkennen. Er befindet sich auf der Südseite des Trackers in der fixen 0 ° Position. Der Neigungssensor befindet sich auf der Unterseite des trackenden Holzstücks, um vor Regen geschützt zu sein. Das Bild wurde am 15.05.2022 in Uetersen im Rahmen der Vortestphase aufgenommen. Inzwischen ist aufgrund eines Sensorausfalls, ein Lichtsensor auf der Haupt-Trackingebene erneuert worden (eigenes Foto).

Anhang 11 Blockschaltplan RAGMAR



Komponenten sind in Form von Blöcken dargestellt. Ist die Verbindung zwischen den Blöcken durchgängig, dient sie nicht der Kommunikation, sondern nur der Stromversorgung. Gestrichelte Linien umfassen sowohl die Versorgungsspannung als auch die Kommunikation mit dem Mikrokontroller. Oben links erzeugt ein 10 Wp PV-Modul Spannung, die über einen Gleichspannungswandler verringert und konstant gehalten wird. Die Gleichrichterdiode hinter dem Wandler verhindert, dass Strom aus den Akkus in Richtung des PV-Modules fließen kann. Es sind 16 Li-Ionen Akkus mit einer Zellspannung von circa 8,2 V parallel verschaltet, sodass die Gesamtspeicherkapazität 9,6 Ah beträgt. Neben dem Mikrokontroller (vgl. Arduino 2022) hängt auch die Motorsteuerung (vgl. STMicroelectronics N.V. 2002) direkt an den Akkus: Beide haben einen internen Wandler auf dem Board, um die jeweils verwendete Systemspannung zu erhalten. Über einen I²C Multiplexer (Texas Instruments 2019) sind 5 Lichtsensoren (ROHM Semiconductor GmbH 2009) und die Echtzeituhr (Maxim Integrated 2015) mit dem Mikrokontroller verbunden. Relevant für die Auswertung sind der Lichtsensor Mess N (LMN) und der Lichtsensor Mess Süd (LMS), die sich beide in Trackerebene befinden. Mit Hilfe der Echtzeituhr, dem Schrittmotor, der die Trackerachse über Zahnradübersetzung dreht, und dem Accelerometer (Analog Devices 2009), zur Messung des Neigungswinkels, ist die astronomische Steuerung verwirklicht. Die Akkuspannung RAGMAR's wird über einen Spannungsteiler gemessen. Bei Spannungen < 7 V aktiviert sich ein Lademodus, in dem sich die Messfrequenz reduziert und Tracking deaktiviert wird. Alle Messdaten werden in Textdateiform auf der Mikro-SD-Karte (CATALEX 2013) gespeichert, die über das zugehörige Modul mit dem Mikrokontroller verbunden ist. Auch die Daten für die astronomische Steuerung sind darauf gespeichert und werden täglich vom Programm eingelesen. Um die Daten der SD-Karte auszulesen, muss das Programm durch den Programm-Start/Stopp-Schalter deaktiviert werden, damit kein Datenverlust entsteht. Der Status des aktiven Programms wird durch die grüne Programm-Start/Stopp-LED angezeigt. Eine rote ERROR-LED aktiviert sich, wenn ein Systemfehler besteht, zum Beispiel wenn die astronomischen Daten nicht eingelesen werden können oder wenn der Lademodus aktiv ist (eigene Abbildung).

Anhang 12 Berechnung Messunsicherheit Echtzeituhr

Die Messunsicherheit der Echtzeituhr, ausgedrückt in Form einer Frequenzunsicherheit des Kristalls, wird in die Messunsicherheit der Zeit umgerechnet. Die verwendeten Werte stammen vom Datenblatt der Echtzeituhr (Maxim Integrated 2015). Die Output-Frequenz des Kristalls beträgt:

$$f_{out} = 32.768 \text{ Hz}$$

Die temperaturabhängige Abweichung der Frequenzstabilität beträgt 2 ppm bei Anwendung im Temperaturbereich von 0 bis 40 °C, was im Sommer der Fall sein sollte. Die Frequenzabweichung aufgrund von Kristallalterung wird mit 1 ppm angenommen, da der Kauf der Echtzeituhr etwa ein halbes Jahr zurückliegt. Aufgrund des geringeren Einflusses auf die Gesamtmessunsicherheit werden weitere Parameter wie die Genauigkeit der integrierten Temperaturmessung, die Frequenzstabilität in Abhängigkeit von der Spannungsversorgung und die AD-Wandlungsgenauigkeit vernachlässigt.

Es ergibt sich als angenommene Gesamtmessunsicherheit der Frequenz:

$$\frac{\Delta f}{f_{out}} = 3 \text{ ppm} \leftrightarrow \Delta f = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 32.768 \text{ Hz} = 0,0983 \text{ Hz} \approx 0,1 \text{ Hz}$$

Zur Umrechnung in eine Zeiteinheit wird die Beziehung zwischen Periodendauer T in s und Frequenz f in Hz verwendet:

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{Harten 2012: 120})$$

Die partielle Ableitung $T'(f)$ lautet:

$$T'(f) = -f^{-2}$$

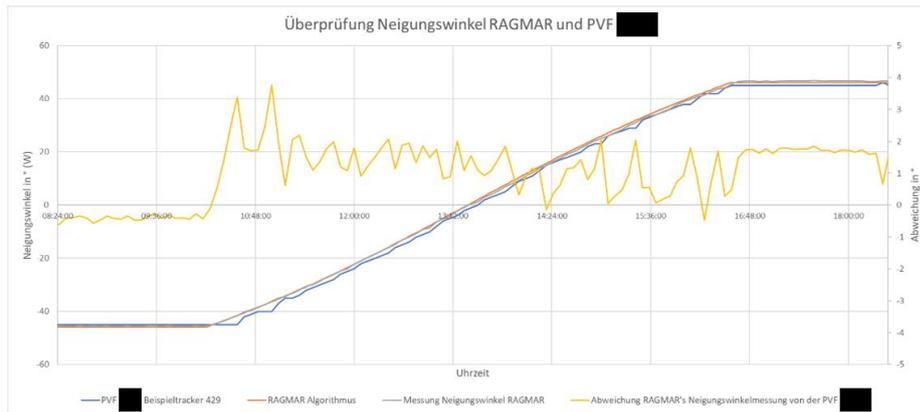
Durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz (Schöne 1997: 11) ergibt sich eine Zeitabweichung von:

$$\Delta T = |-(32768 \text{ Hz})^{-2}| \cdot 0,1 \text{ Hz} = 9,32 \cdot 10^{-11} \text{ s} \approx 10^{-10} \text{ s}$$

Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 2 Monaten im Juni und Juli verursacht die Unsicherheit der Zeit maximal eine Abweichung von:

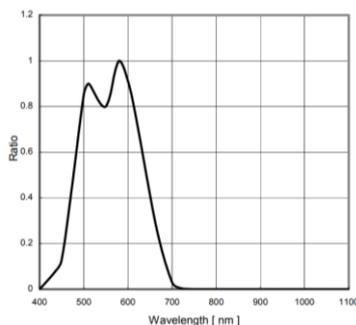
$$10^{-10} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 61 \frac{\text{d}}{2 \text{ Monate}} = 0,000527 \text{ s} \approx 0,6 \text{ ms}$$

Anhang 13 Überprüfung Neigungswinkel RAGMAR und PVF X



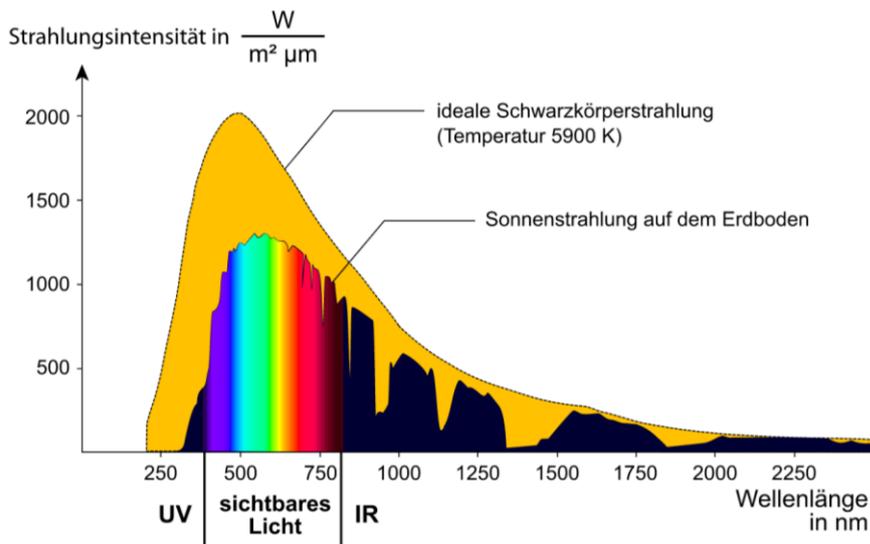
Die Daten wurden am 04.06.2022 in X aufgezeichnet. RAGMAR's Neigungswinkel werden in Abhängigkeit von der Zeit durch den SPA ermittelt, beschrieben in Kapitel 3.3. Der Algorithmus folgt der orangenen Funktion. Eine Messung mit Hilfe von RAGMAR's Neigungswinkelsensor wird durch die graue Funktion dargestellt: Da eine Abweichung von der orangenen Funktion visuell kaum ermittelbar ist, fällt der Fehler von RAGMAR's Hardwaresteuerung sehr gering aus. Der Beispieltracker Nummer 429 von Trafo 8 wird durch die gemessene blaue Funktion dargestellt. Die einprogrammierten Werte der PVF X sind nicht verfügbar. Die gelbe Funktion, die der Sekundärachse zuzuordnen ist, stellt die absolute Abweichung des Beispieltrackers zur Messung von RAGMAR dar: Die Abweichung beträgt größtenteils 2°. Dort wo die Abweichungen etwas größer ausfallen, scheint der Fehler beim Tracker der PVF X zu liegen, da zum Beispiel gegen 10:30 Uhr Schwankungen im fast linearen Kurvenverlauf erkennbar sind. Da die Abweichungen im Mittel deutlich positiv ausfallen und nicht um die 0° Position variieren, ist davon auszugehen, dass sich der theoretische Algorithmus der PVF X minimal vom SPA unterscheidet. Andere Gründe wie ein etwas verschobener Zeitstempel der PVF X, wären theoretisch auch möglich (eigenes Diagramm).

Anhang 14 Mess-Spektrum von RAGMAR's Umgebungslichtsensoren



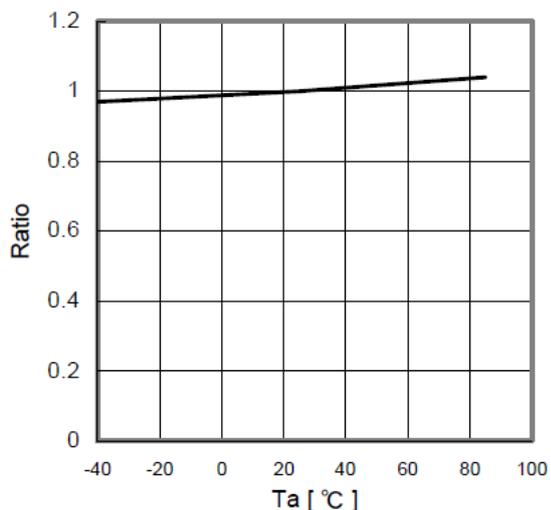
Abgebildet ist ein Auszug aus dem Datenblatt des Umgebungslichtsensormoduls BH1750FVI (ROHM Semiconductor GmbH 2009: 3). Es zeigt das auf die Peak-Wellenlänge von 560 nm normierte Ausgangssignal des Umgebungslichtsensors an, abhängig von der Wellenlänge des Lichts. Der messbare Bereich beträgt circa 400 bis 700 nm und deckt weitgehend das Spektrum des sichtbaren Lichtes von circa 380 bis 780 nm ab (vgl. Joachim Herz Stiftung 2022a). Allerdings tritt im Gegensatz zum Spektrum der Sonne (vgl. Anhang 15) um die 550 nm eine Minderperformance des Sensors auf (ROHM Semiconductor GmbH 2009: 3).

Anhang 15 Spektrum der Sonne



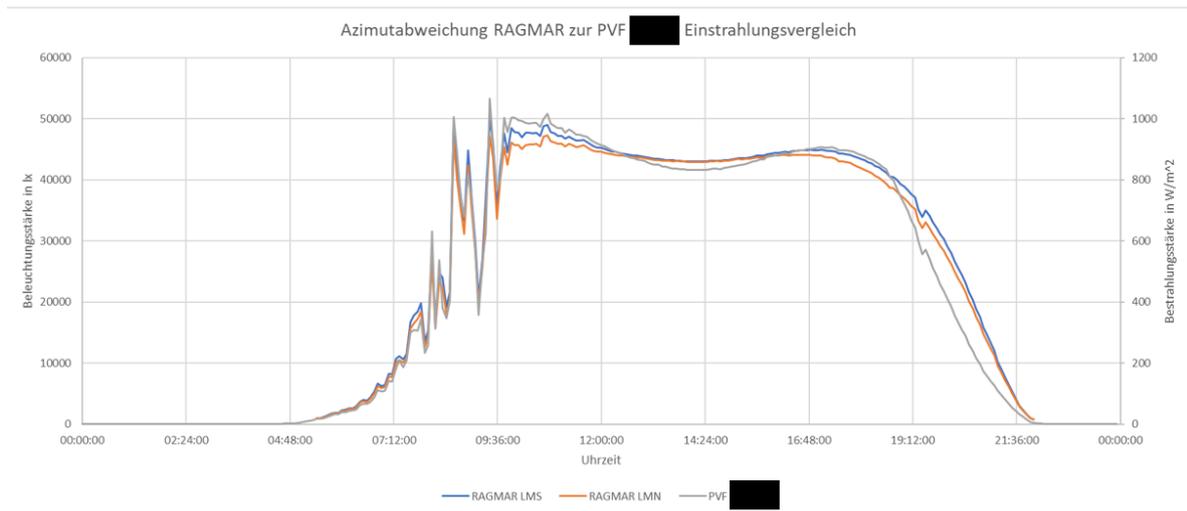
Zu sehen ist das Lichtspektrum der Sonne, ausgedrückt in einer Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Wellenlänge. Die orange ausgefüllte Funktion beschreibt die Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers, der der Strahlungsintensität der Sonne außerhalb der Erdatmosphäre gleich. Die untere, schwarze und regenbogenfarbige Funktion beschreibt die Sonnenstrahlung auf dem Erdboden. Dabei liegt der überwiegende Anteil dieser Strahlung im sichtbaren Bereich, umfasst aber auch zum kleinen Teil ultraviolettes Licht und einen großen Teil des infraroten Lichts. Durch starke Absorption einiger bestimmter Wellenlängen des Lichts, kommt es an einigen Stellen zu Einbrüchen der Strahlungsintensität (vgl. Joachim Herz Stiftung 2022b).

Anhang 16 Temperaturabhängigkeit Umgebungslichtsensor



Das Ausgangssignal des Umgebungslichtsensors ist linear von der Umgebungstemperatur abhängig: Je größer die Außentemperatur ist, desto größer ist das Ausgangssignal, das heißt bei einer größeren Außentemperatur als 20 ° müsste das korrigierte Signal kleiner sein. Die Steigung wurde mit $0,057 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$ Temperaturanstieg ermittelt bei einem Referenzpunkt von circa 20 °, wo der Faktor 1 beträgt (ROHM Semiconductor GmbH 2009: 3).

Anhang 17 Azimutabweichung RAGMAR zur PVF X: Einstrahlungsvergleich



Die Messwerte wurden am 04.06.2022 in X aufgenommen. Das repräsentative Pyranometer 8 der PVF X ist durch die graue Funktion dargestellt. Die Einheit ist die Bestrahlungsstärke, dargestellt auf der Sekundärachse. Die Funktionen in blau und orange sind den Umgebungslichtsensoren der ost/west-trackenden Sensorstation namens RAGMAR in Trackingebene zugeordnet mit der Einheit Beleuchtungsstärke, dargestellt auf der Primärachse. Ab circa 09:36 Uhr bis zum Tagesende kommt fast ausschließlich Direktstrahlung vor. Dabei ist der Zeitraum nach 18:35 Uhr zu vernachlässigen, da aufgrund der astronomischen Steuerungsalgorithmusabweichung zwischen der PVF X und RAGMAR die Neigungswinkel und damit auch die gemessenen Einstrahlungen verschieden sind. Im Betrachtungszeitraum zwischen 09:36 Uhr und 18:35 Uhr ist zu erkennen, dass die Bestrahlungsstärke der PVF X nicht mehr proportional zur Beleuchtungsstärke RAGMAR's ist. Die graue Funktion weist die Form einer stärkeren Delle auf als die blaue und orangene Funktion, was dadurch zu Stande kommt, dass RAGMAR eine geringere Ost/West-Azimutabweichung aufweist als die PVF X. Dies wurde mit einem Kompass festgestellt (eigenes Diagramm).

Anhang 18 Auszug Datenblatt Pyranometer der PVF X

Analog or digital outputs

CMP10 and CMP11 do not require any power. Incoming solar radiation generates a continuous millivolt output, which is converted in a data logger to irradiance in W/m^2 using the calibrated sensitivity. For easy integration into SCADA systems SMP10 and SMP11 have Modbus® RTU RS-485 serial communication, plus an amplified analog output. The sensitivity is stored inside for standardized outputs and they feature improved response time and better temperature compensation.

CMP10 and SMP10 have internal desiccant that lasts up to 10 years.

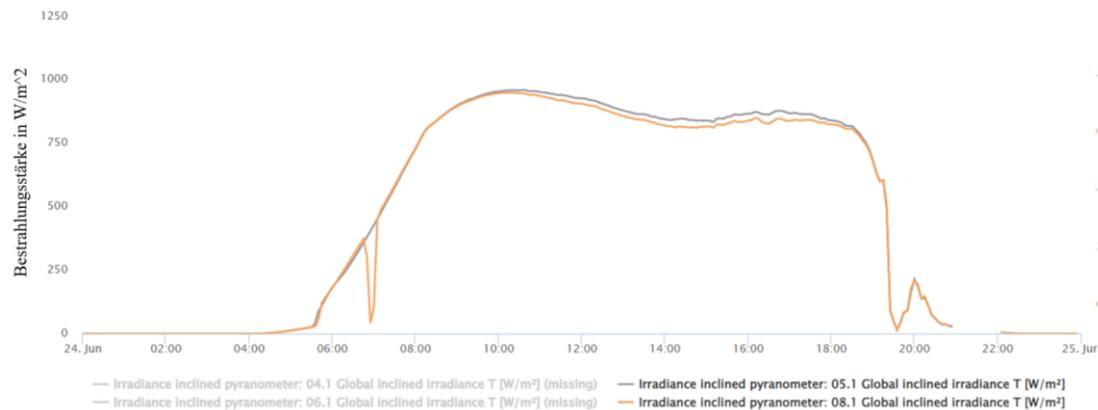
5 Year Warranty

All pyranometers from Kipp & Zonen come with a 5 year warranty and we have service and calibration centers around the world.

	CMP10 CMP11	SMP10 SMP11
Classification to ISO 9060:2018	Spectrally Flat, Class A	Spectrally Flat Class A
Sensitivity	7 to 14 $\mu V/W/m^2$	-
Impedance	10 to 100 Ω	-
Expected output range (0 to 1500 W/m^2)	0 to 20 mV	-
Maximum operational irradiance	4000 W/m^2	-
Analog output - V-version	-	0 to 1 V
Analog output range*	-	-200 to 2000 W/m^2
Analog output - A-version	-	4 to 20 mA
Analog output range*	-	0 to 1600 W/m^2
Serial output	-	RS-485 Modbus®
Serial output range	-	-400 to 4000 W/m^2
Response time (63 %)	< 1.7 s	< 0.7 s
Response time (95 %)	< 5 s	< 2 s
Spectral range (20 % points)	270 to 3000 nm	270 to 3000 nm
Spectral range (50 % points)	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm
Zero offsets (unventilated)		
(a) thermal radiation (at 200 W/m^2)	< 7 W/m^2	< 7 W/m^2
(b) temperature change (5 K/h)	< 2 W/m^2	< 2 W/m^2
Non-stability (change/year)	< 0.5 %	< 0.5 %
Non-linearity (100 to 1000 W/m^2)	< 0.2 %	< 0.2 %
Directional response (up to 80 ° with 1000 W/m^2 beam)	< 10 W/m^2	< 10 W/m^2
Spectral selectivity (350 to 1500 nm)	< 3 %	< 3 %
Tilt response (0 ° to 90 ° at 1000 W/m^2)	< 0.2 %	< 0.2 %
Temperature response	< 1 % (-10 °C to +40 °C)	< 1 % (-20 °C to +50 °C) < 2 % (-40 °C to +70 °C)
Field of view	180 °	180 °
Accuracy of bubble level	< 0.1 °	< 0.1 °

Die verbauten Pyranometer der PVF X sind vom Typ SMP10. Die fehlerbehafteten Größen sind der Grafik zu entnehmen. SMP10 beinhaltet auch eine Temperaturkompensation (KIPP & ZONEN 2012).

Anhang 19 Abweichung der trackenden Pyranometer der PVF X untereinander



Dies ist ein Screenshot aus dem Yportal vom 24.06.2022 von der PVF X. Die Bestrahlungsstärke ist in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt für die zwei ost/west-trackenden Pyranometer von Trafostation 5 und 8. Gegen 7 Uhr erkennt man eine kurzzeitige, große Differenz zwischen den Sensorwerten, was wahrscheinlich auf eine Wolke zurückzuführen ist, die ihren Schatten nur auf das Pyranometer 8 geworfen hat, aufgrund der großen Entfernung der Pyranometer zueinander. Im Verlaufe des Tages lässt sich eine geringe, relativ konstante Differenz zwischen den gemessenen Bestrahlungsstärken feststellen, was sehr wahrscheinlich mit einer geringen Azimutdifferenz der Trackerreihen begründet werden kann. Möglich wäre auch eine verschiedene Kalibrierung der verbauten Pyranometer und Neigungssensoren der PVF X.

Anhang 20 Auszug Ertragsgutachten der PVF X

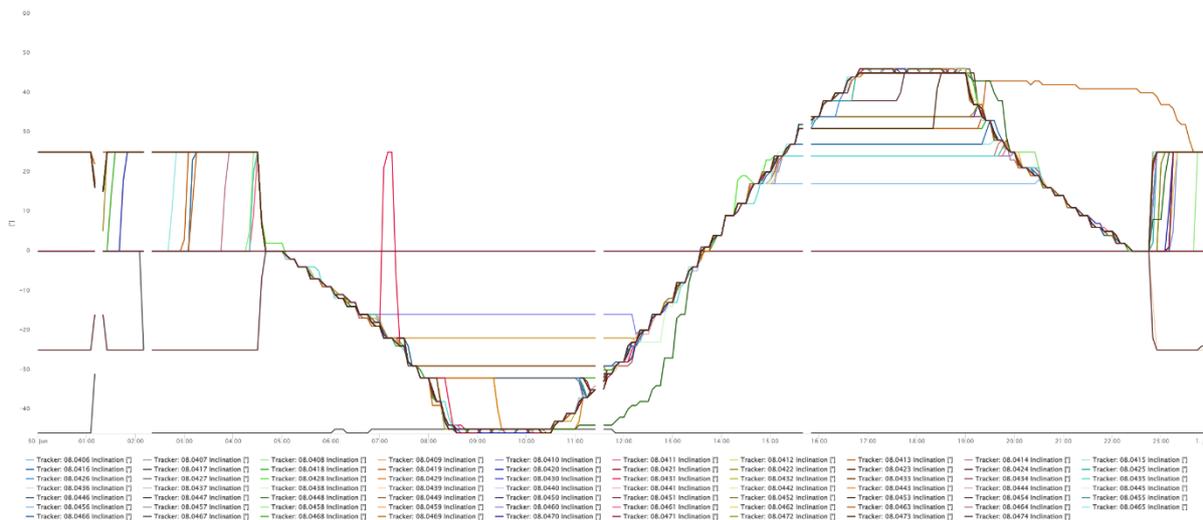
Table 21: Monthly results (100 % technical availability, grid-injection, tracking system)

	GHI	GTI	Ta	Tm	Initial electrical production			Deviation PR/PR _{Year}	Monthly correction factor
	(kWh/m ²)	(kWh/m ²)	(°C)	(°C)	MWh	kWh/kWp	PR		
Jan	14	18	1.6	4.5	563	15	82.6%	-12.8%	0.872
Feb	30	40	1.2	5.8	1426	38	96.8%	2.2%	1.022
Mar	77	104	3.3	11.5	3799	102	98.1%	3.5%	1.035
Apr	123	162	7.4	18.4	5847	157	96.8%	2.2%	1.022
May	166	217	11.3	23.1	7749	208	95.6%	0.9%	1.009
Jun	174	226	14.2	26.0	7844	210	92.9%	-2.0%	0.980
Jul	165	213	17.1	28.4	7318	196	92.3%	-2.6%	0.974
Aug	131	166	16.8	27.1	5878	158	94.9%	0.1%	1.001
Sep	86	114	13.8	22.6	4091	110	96.3%	1.6%	1.016
Oct	46	57	9.8	15.8	2129	57	99.4%	4.9%	1.049
Nov	17	21	6.0	9.4	748	20	94.0%	-0.8%	0.992
Dec	10	13	3.0	5.4	371	10	76.8%	-19.0%	0.810
Year	1039	1351	8.8	19.2	47763	1280	94.8%		

(GHI = Global horizontal irradiation, GTI = Irradiation in module plane, Tm = Average module temperature during running, Ta = Ambient temperature, 24 h average).

Das Ertragsgutachten wurde von einer nicht nennbaren Firma, basierend auf Daten des Betreibers und Errichter des Parks vom 07.07.2021 nach Inbetriebnahme des Parks erstellt. Verwendet wird das PR, aufgegliedert in die einzelnen Monate. Es handelt sich um ein Gutachten aus interner Anlagendokumentation der CEE Operations.

Anhang 21 Abweichungen der Trackerneigungswinkel der PVF X untereinander



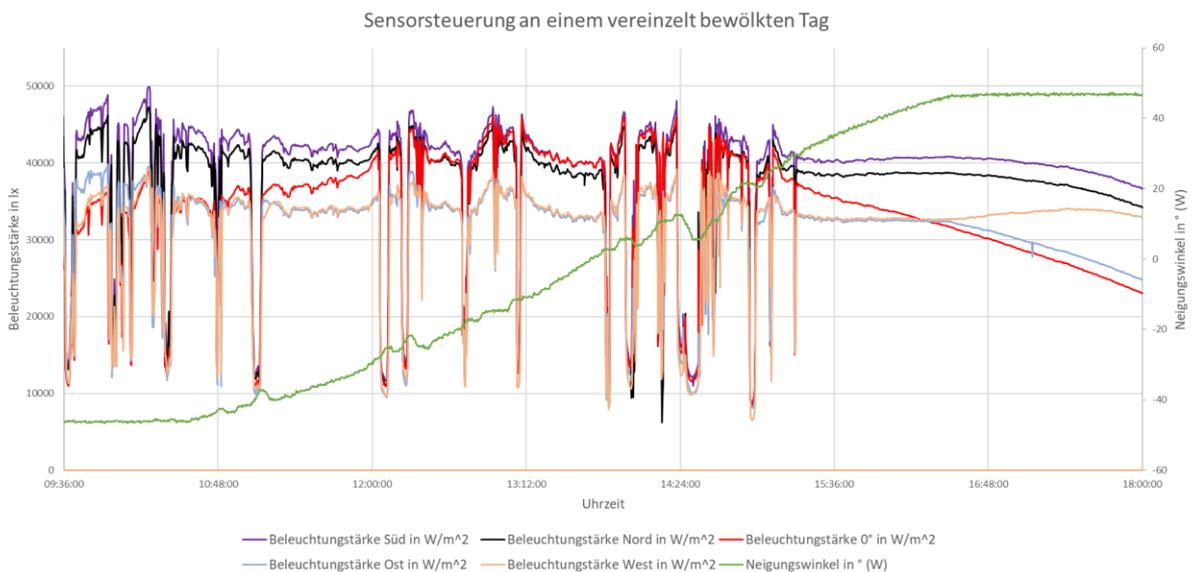
Dargestellt ist ein Auszug aus dem Yportal von 69 Trackern des Concentrators, das heißt des Datensammelpunkts, 14 der Trafostation 8 der PVF X vom 30.06.2022. Der Neigungswinkel ist abhängig von der Uhrzeit abgebildet. Auch wenn ein Großteil der Tracker zu funktionieren scheinen, gibt es bei sehr vielen Trackern Abweichungen von der Soll-Position, die sich von circa -46 ° West bis 46 ° West verstellen sollte. Die Tracker korrigieren ihre Position nicht kontinuierlich, sondern in circa 5 min Schritten, was die Zackenform der Neigungswinkel erklärt. Abweichungen könnten möglicherweise auf mechanische Verbiegungen der Trackerachse zurückzuführen sein.

Anhang 22 RAGMAR's Sensorsteuerung bei bedecktem Himmel



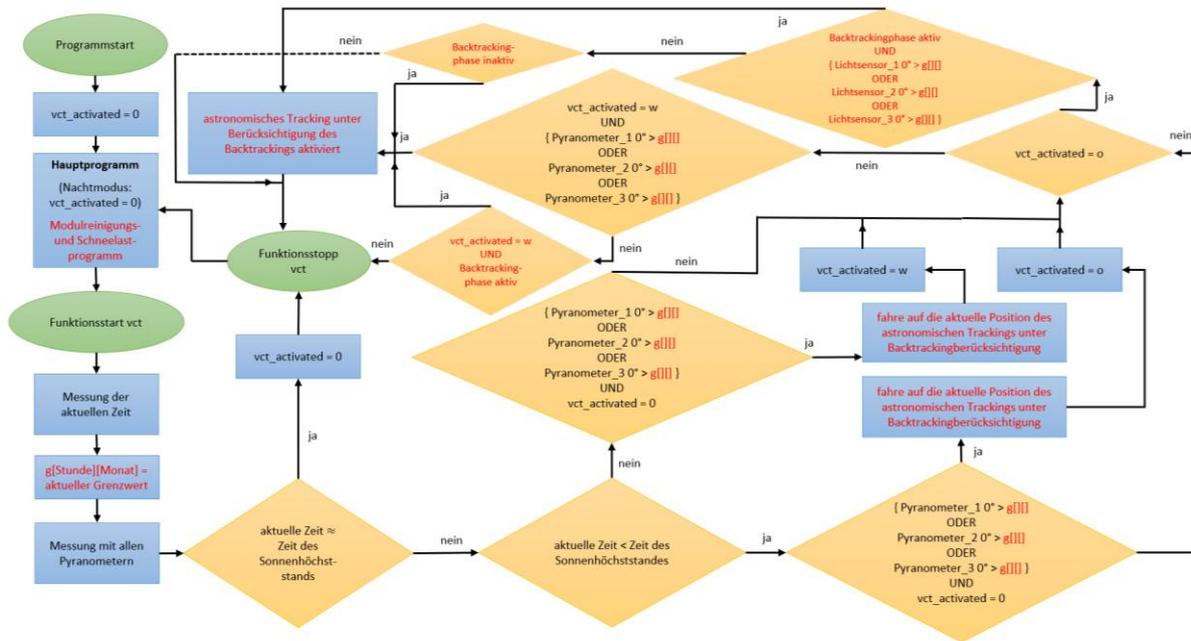
Dargestellt sind Ausschnitte aus RAGMAR's Sensorsteuerung vom 26.03.2022 in Uetersen. RAGMAR richtet sich durchgängig nach der Position der größten, gemessenen Beleuchtungsstärke aus. Das linke Bild wurde mittags gegen 12:00 Uhr aufgenommen: die optimale Position ist nahe 0° . Das 2. Bild wurde gegen 14:30 Uhr aufgenommen. Obwohl der Himmel schon etwas heller ist, ist die 0° Position immer noch optimal. Das rechte Bild wurde gegen 15:30 Uhr aufgenommen: Der Himmel hat sich noch etwas weiter aufgeklärt, sodass die optimale Position des Trackers Richtung Westen tendiert. Zum Vergleich: Die Sonne würde am gleichen Tag um 12:00 Uhr auf circa 13° Ost stehen und um 14:30 Uhr bereits auf $> 46^\circ$ West (eigene Aufnahmen).

Anhang 23 Sensorsteuerung an einem vereinzelt bewölkten Tag



Mit RAGMAR's Sensorsteuerung wurde am 28.04.2022 in Uetersen gemessen. Der Neigungswinkel in $^\circ$ Westneigung ist in Abhängigkeit von der Uhrzeit auf der Sekundärachse dargestellt. Die anderen Funktionen sind RAGMAR's Umgebungslichtsensoren zuzuordnen, deren Beleuchtungsstärken auf der Primärachse dargestellt sind. Die rote Funktion gehört zu dem 0° Sensor. Die lila und schwarzen Funktionen gehören zu den Sensoren, die in Trackingebene angebracht sind. Die blauen und hautfarbenen Funktionen sind dem West- und Ostsensor zuzuordnen, die für die Sensorsteuerung benötigt werden. Während der Haupttrackingphase versucht das Programm den Tracker so zu neigen, dass West- und Ostsensor die gleiche Beleuchtungsstärke messen. Es ist erkennbar, dass bei einer kurzzeitigen Verschattung RAGMAR's durch Wolken, die optimale Trackingposition in Richtung 0° tendiert (eigene Messung).

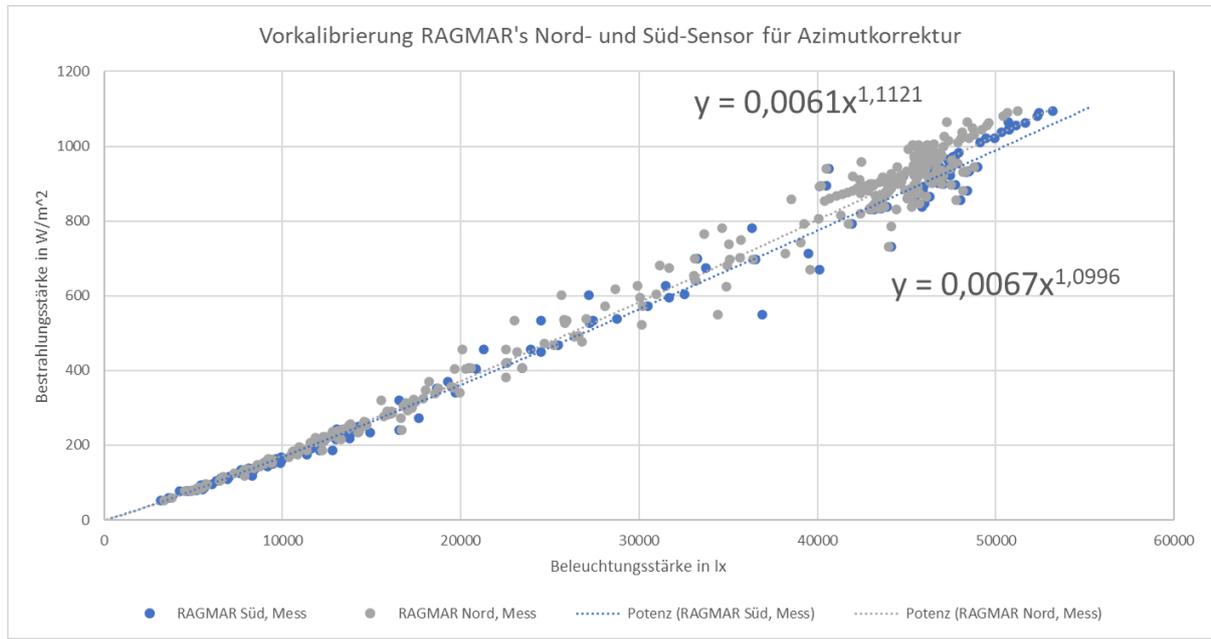
Anhang 24 vct-Steuerung bei Umsetzung auf die PVF X



Dies ist der Programmablaufplan der vct-Steuerung unter Backtrackingberücksichtigung und Berücksichtigung eines datum- und uhrzeitabhängigen Grenzwertes bei einer Anwendung auf die PVF X. Es wird auf die Erkenntnisse von Abbildung 23 aufgebaut. Rote Schrift zeigt Änderungen und Ergänzungen an: Der Initialkippvorgang findet bei $vct_activated = „o“$ und $„w“$ während der Backtrackingzeit nur bis zur Backtrackingposition statt, was durch die rote Schrift der beiden blauen Boxen rechts aktualisiert wurde. Nimmt $vct_activated$ den Wert $„w“$ an, dann folgt die vct-Steuerung trotz Grenzwertunterschreitung während der Backtrackingzeit dem Backtrackingalgorithmus der PVF X, dargestellt durch Hinzufügen der linken, unteren, gelben Raute mit ausschließlich roter Schrift. Nimmt $vct_activated$ den Wert $„o“$ an und ist die Backtrackingphase aktiv, dann folgt die vct-Steuerung dem Backtracking unter der Voraussetzung, dass während dieser Zeit der Grenzwert überschritten bleibt, dargestellt durch die beiden oberen gelben Boxen mit roter Schrift. Der konstante Grenzwert von 15.000 lx wurde durch das Variablenarray $g[Stunde][Monat]$, kurz $g[[]]$, ersetzt. Dieses wird, wie durch das zweidimensionale Array beschrieben, abhängig von der jeweiligen Stunde des Tages und des Monats fortlaufend vom Programm aktualisiert. Zur Ausfallsicherheit sollten 3 Pyranometer auf 0° verwendet werden. Fällt eines der Pyranometer aus, könnte dies vom Programm als ein 0-Wert interpretiert werden, mit dem die abgebildete Steuerung funktionieren würde. Im Hauptprogramm sollte ein Algorithmus zur Modulreinigung implementiert werden: Da die vct-Steuerung eine Neigungswinkelverringerung bewirkt, könnte auch der Modulreinigungseffekt reduziert werden (Quaschnig 2019: 97). Um die Modulreinigung zu gewährleisten, könnten bereits vorhandene Sensoren auf der PVF X zur Detektion von Verunreinigungen in die Steuerung mit eingebunden werden: Erreicht die Verunreinigung einen bestimmten Grenzwert, dann wird bis zur Grenzwertunterschreitung wieder astronomisch getrackt und zusätzlich auf die Nachposition von 25° Westneigung gefahren. Bei Schneefall würde laut vct-Steuerung die astronomische Steuerung deaktiviert werden und der Tracker letztendlich auf 0° bleiben. Bei größeren Neigungswinkeln kann der Schnee besser abgeworfen werden. Außerdem kann durch Tracken bei schneebedecktem Boden auch bei Diffusstrahlung ein Mehrertrag erzielt werden (Quesda et al. 2015: 155). Schnee kann beispielsweise durch Pyranometer und Temperatursensoren erkannt werden: Sobald alle Pyranometer während des Tages aufgrund von Schneebedeckung 0-Werte senden und die Modultemperatur $\leq 0^\circ\text{C}$ ist, handelt es sich sehr

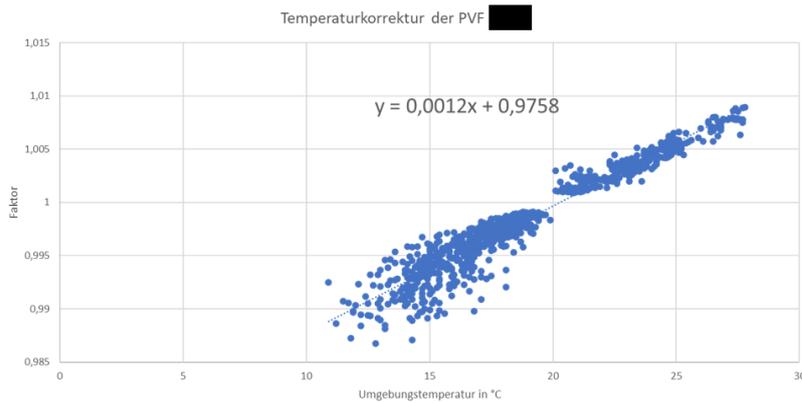
wahrscheinlich um Schnee, sodass auch hier die astronomische Steuerung aktiviert werden kann. Eine Alternative bietet die Einbindung oder das manuelle Beobachten durch eine Snow-Cam. Beachtet werden sollte hierbei, dass das Tracking rechtzeitig bei niedriger Akkuspannung deaktiviert wird, um eine Tiefenladung der Akkus zu verhindern (eigener Programmablaufplan).

Anhang 25 Vorkalibrierung RAGMAR's Nord- und Süd-Sensor für Azimutkorrektur



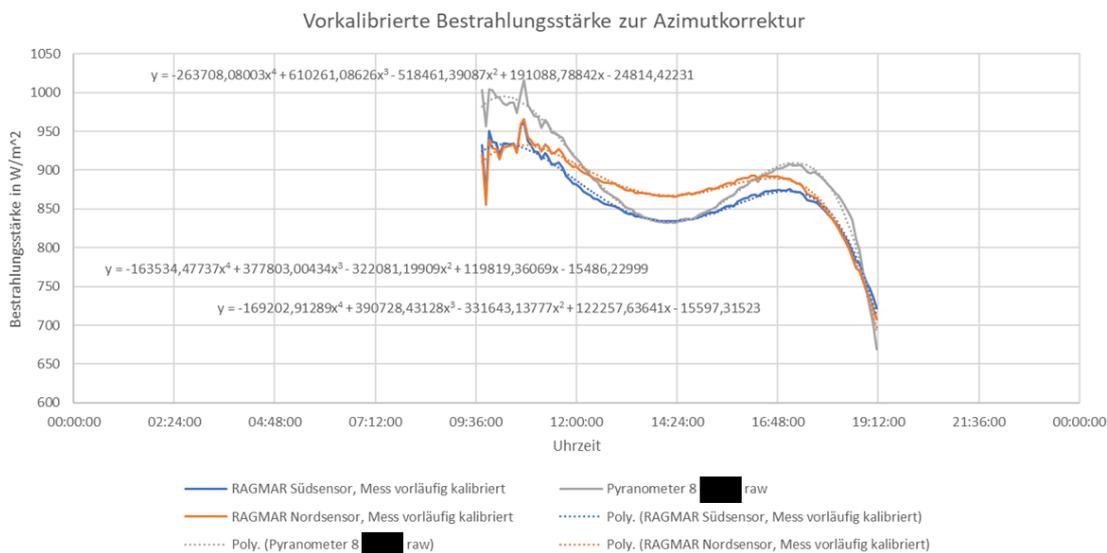
Der Nord- und Süd-Umgebungslichtsensor RAGMAR's wird bei gleichem Neigungswinkel auf die raw-Bestrahlungsstärke des Pyranometers 8 der PVF X kalibriert. Verwendet werden mehr als 300 Messwerte verschiedener Tage. Der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Bestrahlungsstärke ist dabei fast linear, der Standardfehler bei einer linearen Regression liegt bei circa $36 \frac{W}{m^2}$. Jedoch kann eine Potenz-Ausgleichsfunktion den Fehler der Ausgleichsfunktion noch minimieren. Die Messwerte geringerer Beleuchtungsstärken streuen weniger um die Ausgleichsfunktion, da bei durchgängig diffusem Licht die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Ortes weniger abweicht als beispielsweise im Sonne- und Wolkenwechsel. Bei direktem Licht sollten die Messwerte theoretisch auch weniger streuen, jedoch kommt die große Abweichung dort durch die Azimutabweichung RAGMAR's von der PVF X zu Stande, die im Rahmen dieser Vorkalibrierung ausgeglichen werden soll (eigenes Diagramm).

Anhang 26 Temperaturkorrektur der PVF X



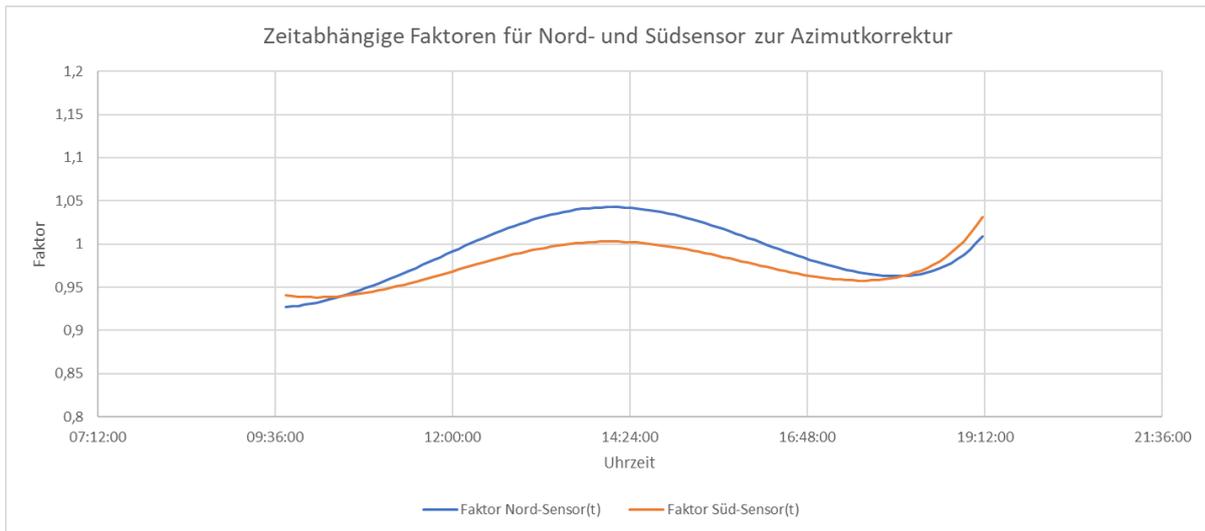
Im Diagramm beschreibt der Faktor der y-Achse den Quotienten der vom Pyranometer 8 gemessenen raw-Bestrahlungsstärke und der vom Pyranometer intern temperaturkompensierten Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der Außentemperatur, aufgenommen über eine Woche. Einige Daten wurden herausgefiltert, da die Temperaturkompensation teilweise nicht bei zu geringer Bestrahlungsstärke eingesetzt wird. Möglich ist auch, dass weitere Faktoren außer der Außentemperaturabhängigkeit für die Temperaturkompensation verwendet werden, da die Werte stark streuen. Trotzdem ist ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatureausgleichsfaktor und Umgebungstemperatur erkennbar. Je größer die Umgebungstemperatur, desto größer ist der Temperaturkorrekturfaktor, desto kleiner ist die temperaturkompensierte Bestrahlungsstärke. Der Faktor ändert sich um $0,12 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$ Temperaturanstieg mit einem Referenzpunkt von circa $20 \text{ }^\circ\text{C}$, bei dem der Faktor 1 beträgt. Die Daten stammen vom Yportal.

Anhang 27 Vorkalibrierte Bestrahlungsstärken zur Azimutkorrektur



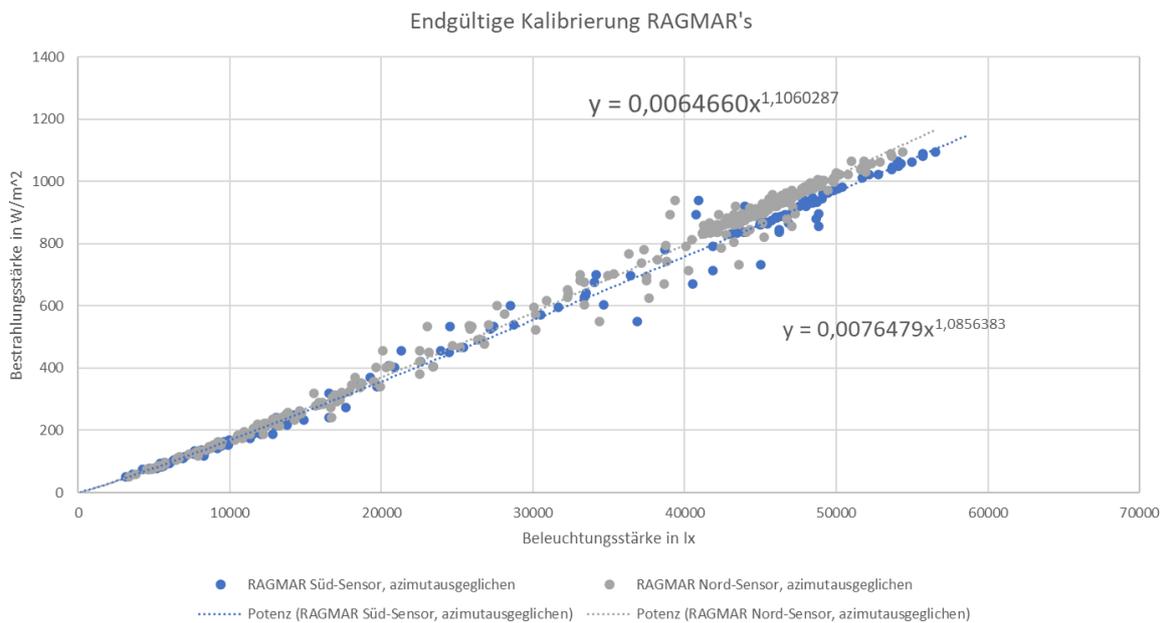
Nach Vorkalibrierung des Nord- und Südsensors von RAGMAR, werden die Bestrahlungsstärken der Umgebungslichtsensoren zusammen mit der Bestrahlungsstärke der PVF X in Abhängigkeit von der Uhrzeit am 04.06.2022 in einem Diagramm dargestellt. Ausgleichsfunktionen 4. Ordnung wurden aufgrund höherer Genauigkeit durch die Messwerte gelegt (eigenes Diagramm).

Anhang 28 Zeitabhängige Faktoren für Nord- und Südsensor zur Azimutkorrektur



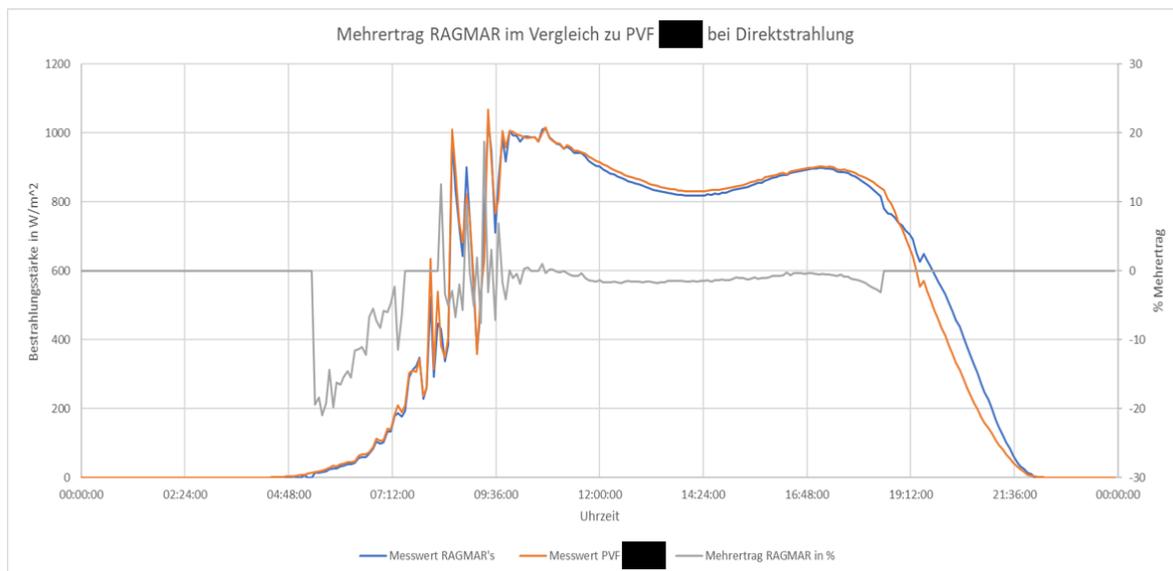
Durch Division der Ausgleichsfunktionen des Nord- und Südsensors durch die Ausgleichsfunktion der raw-Bestrahlungsstärke des Pyranometers 8 der PVF X (vgl. Anhang 27), ergibt sich je Umgebungslichtsensor ein zeitabhängiger Ausgleichsfaktor zur Azimutkorrektur (eigenes Diagramm).

Anhang 29 Endgültige Kalibrierung RAGMAR's



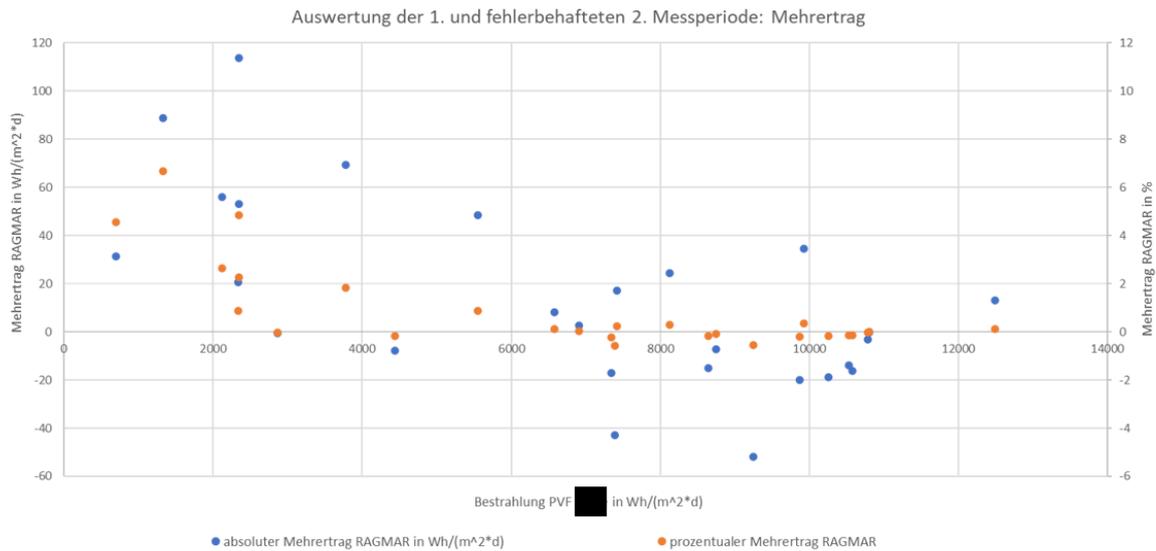
Die finale Kalibrierung wird für den Nord- und Südsensor RAGMAR's in Trackingebene durchgeführt unter der Voraussetzung, dass die Neigungswinkel der PVF X und RAGMAR's nahezu gleich sind. Es wurden über 400 Kalibrierwerte mehrerer Tage pro Ausgleichsfunktion berücksichtigt. Die Bestrahlungsstärke des Pyranometers 8 der PVF X ist in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke von RAGMAR's Umgebungslichtsensoren abgebildet. Der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Bestrahlungsstärke ist dabei fast linear, der Standardfehler bei einer linearen Regression liegt bei circa $25 \frac{W}{m^2}$ und hat sich im Vergleich zur Vorkalibrierung von Anhang 25 deutlich verringert (eigenes Diagramm).

Anhang 30 Mehrertrag RAGMAR im Vergleich zur PVF X bei Direktstrahlung



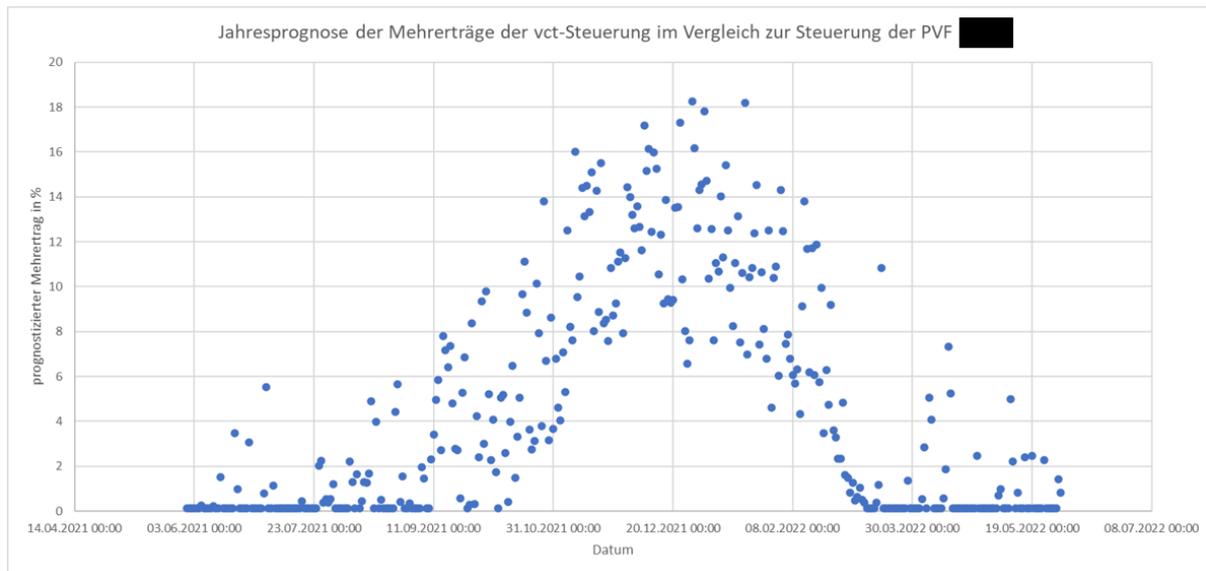
Am 04.06.2022 wurde der prozentuale Mehrertrag RAGMAR's im Vergleich zur PVF X bestimmt. Auf der Primärachse ist die Bestrahlungsstärke RAGMAR's (blaue Funktion) und die der PVF X (orangene Funktion) in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Die graue Funktion der Sekundärachse beschreibt den prozentualen Mehrertrag RAGMAR's im Vergleichszeitraum. Gegen Morgen ist der Mehrertrag RAGMAR's negativ: RAGMAR steht auf 0° , wohingegen sich die PVF X im Backtrackingalgorithmus befindet. Durch das Horizontleuchten ist die 0° Position trotz Diffuslicht nicht optimal. Allerdings fällt der absolute Minderertrag RAGMAR's aufgrund der geringen Bestrahlungsstärken sehr gering aus. Gegen Abend ist zwar ein geringer Minderertrag RAGMAR's im Diagramm erkennbar, allerdings ist dieser auf den Fehler der Azimutausgleichsfunktion zurückzuführen. Bei Anwendung der vct-Steuerung auf die PVF X sollte bei Direktstrahlung am Abend kein Minderertrag entstehen (eigenes Diagramm).

Anhang 31 Auswertung der 1. und fehlerbehafteten 2. Messperiode: Mehrertrag



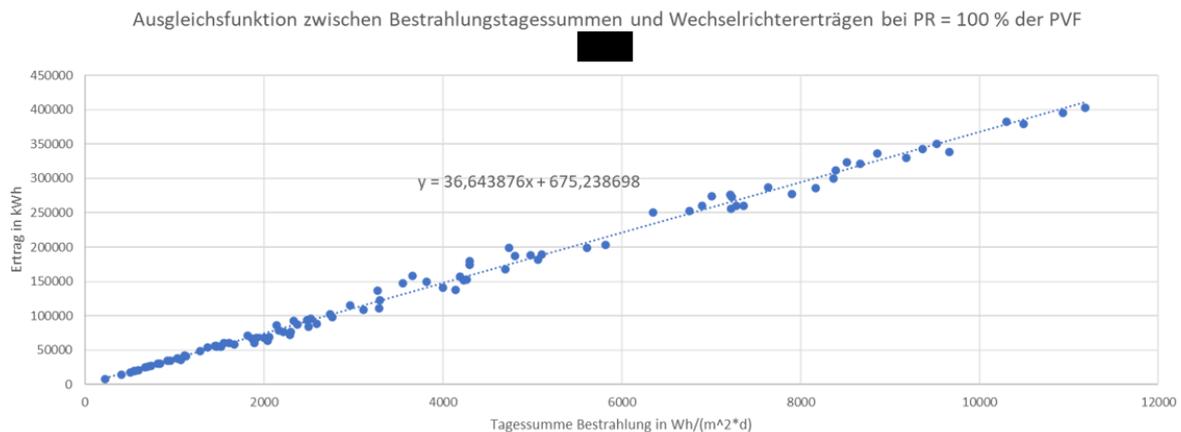
Die Tagesauswertung der ersten und fehlerbehafteten 2. Messperiode von 27 Tagen bezüglich des erzielten Mehrertrags RAGMAR's ist im Diagramm in Form von je 27 blauen und orangenen Auswertungspunkten in Abhängigkeit von der Bestrahlung des jeweiligen Tages dargestellt. Dabei ist der absolute Mehrertrag in Form der blauen Messpunkte auf der Primärachse und der prozentuale Mehrertrag, bezogen auf die Bestrahlung der PVF X pro Tag, in Form von orangenen Messpunkten auf der Sekundärachse dargestellt. Ein Beispiel: Am 27.06.2022 erzielte RAGMAR's vct-Steuerung bei einer Bestrahlung von $693 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ einen absoluten Mehrertrag von $31,50 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ und einen prozentualen Mehrertrag von $\frac{31,5 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}}{693 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}} \cdot 100 = 4,55 \%$, was den beiden Auswertungspunkten ganz links im Diagramm entspricht. Auch wenn die Ergebnisse der 2. Messperiode nicht in der rechnerischen Auswertung berücksichtigt werden, sind die Ergebnisse hilfreich, um eine Tendenz des Mehrertrags in Abhängigkeit von der Bestrahlung festzustellen: Bei Bestrahlungen $> 6000 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ sind kaum prozentuale Mehr- oder Mindererträge RAGMAR's feststellbar, wohingegen RAGMAR bei Bestrahlungen $< 6000 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ tendenziell einen steigenden Mehrertrag erzielt, je geringer die Bestrahlung pro Tag ist (eigenes Diagramm).

Anhang 32 Jahresprognose der Mehrerträge der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X



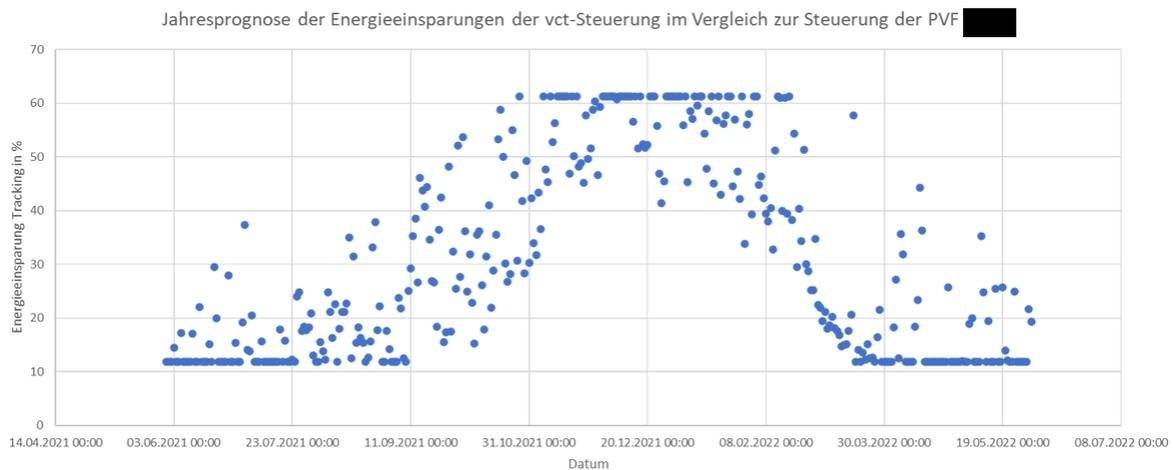
Auf Basis der Jahresdaten der Bestrahlungsstärke der PVF X und der logarithmischen Ausgleichsfunktion von Abbildung 28 wird der prognostizierte, prozentuale Mehrertrag der PVF X ausgerechnet, wenn diese mit einer vct-Steuerung ausgestattet werden würde, im Vergleich zur aktuellen Steuerung. Der Mehrertrag wird in Abhängigkeit vom Datum auf 1 Jahr, vom 31.05.2021 bis zum 31.05.2022, hochgerechnet. Man erkennt einen sehr viel größeren, prozentualen Mehrertrag in den Wintermonaten im Vergleich zum Sommer, da im Winter geringere Bestrahlungstagesummen vorkommen. Maximal können durch die Prognose 18 % Mehrertrag pro Tag erzielt werden. Die vielen Messwerte nahe 0, vor allem im Sommer, resultieren aus der verwendeten Konstanten von 0,1254 % Mehrertrag als Ausgleichsfunktion für Bestrahlungen circa $> 4200 \frac{Wh}{m^2 \cdot d}$ (eigenes Diagramm).

Anhang 33 Ausgleichsfunktion zwischen Bestrahlungstagesummen und Wechselrichtererträgen bei PR = 100 % der PVF X



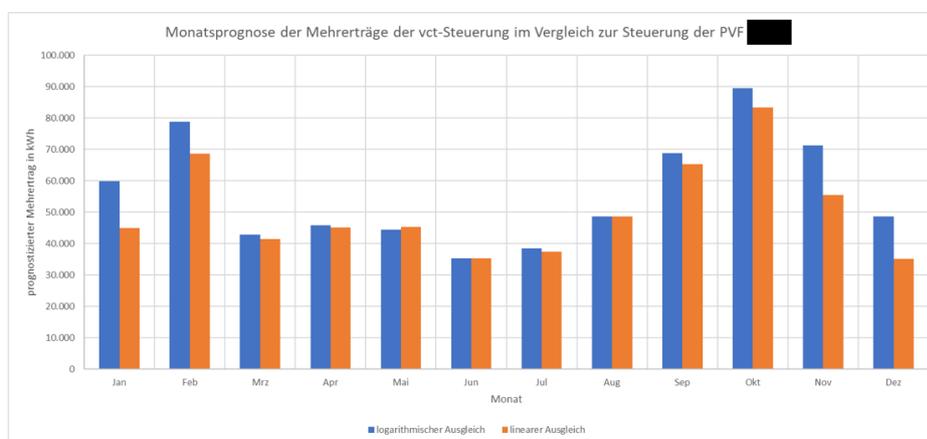
Ziel ist die Umrechnung der Mehrerträge der Bestrahlung, gemessen mit Pyranometern, in den vergütbaren Anlagenertrag, das heißt die eingespeiste Menge Strom, auch als Ertrag in kWh bezeichnet. Ein Teil der Berechnung beinhaltet diese lineare Ausgleichsfunktion zwischen ausfallkompensierten und PR kompensierten Wechselrichtererträgen auf der y-Achse und der Tagessumme der Bestrahlung auf der x-Achse. Für die Daten der Tagessumme der Bestrahlung wurde die maximal gemessene Bestrahlung aller Pyranometer in Trackingebene verwendet, um Ausfälle oder Minderleistungen durch nicht vollständig funktionale Tracker auszuschließen. Für die Daten des Ertrags wurden alle Wechselrichterdaten verwendet. Wechselrichterausfälle oder auch größere Strangausfälle, sichtbar in Form von Wechselrichterminderleistungen, wurden manuell korrigiert, sodass das Diagramm eine ausfallkompensierte Darstellung ist. Abgebildet sind circa 100 Tage, an denen sehr wenige Tracker der PVF X nicht funktionstüchtig waren. Trackerausfälle und Minderleistungen sind nicht kompensiert, da Trackerminderleistungen während der Anlagenlaufzeit wahrscheinlich auch nicht behoben werden und angenommen wird, dass während der Betriebslaufzeit immer wenige Tracker ausfallen werden. Da Jahresdaten betrachtet werden, verändert sich das PR unter anderem aufgrund von Temperaturabhängigkeit oder Reflexionsverlusten in Abhängigkeit des Strahlungseinfallwinkels (Merten 2022: 276). Da aufgrund von Trackerausfällen im Winter, das PR nicht korrekt aus den IST-Daten errechnet werden kann, wird das jahreszeitabhängige PR aus dem Ertragsgutachten der Anlage verwendet (vgl. Anhang 20). Die Wechselrichtererträge werden mit Hilfe der monatsabhängig angegebenen PR des Ertragsgutachtens durch Dreisatz auf ein PR von 100 % hochgerechnet. Diese ausfallkompensierten, PR kompensierten Wechselrichtererträge sind auf der y-Achse abgebildet. Der Standardfehler der Ertragswerte der linearen Regression liegt bei 8.199 kWh, was einer Abweichung von 5,6 %, bezogen auf den Mittelwert der Erträge entspricht (eigenes Diagramm).

Anhang 34 Jahresprognose der Energieeinsparungen der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X



Mit Hilfe der Ausgleichsfunktion der möglichen Energieeinsparung von Abbildung 30 werden die prognostizierten Energieeinsparungen über 1 Jahr hochgerechnet. Diese sind prozentual auf der y-Achse in Abhängigkeit vom Datum auf der x-Achse dargestellt. Man erkennt, dass im Winter sehr große Energieeinsparungen möglich sein können. Maximal sind 61,28 % Energieeinsparung im Hochrechnungsmodell zulässig, da Elektronik- und Speicherverluste durchschnittlich 38,72 % des Energieverbrauchs ausmachen. Dass sich kein Wert unterhalb von 11,85 % Mehrertrag befindet, liegt an der Ausgleichsfunktion, da diese im Bereich höherer Tagessummen der Bestrahlung eine Konstante ist (eigenes Diagramm).

Anhang 35 Monatsprognose der Mehrerträge der vct-Steuerung im Vergleich zur Steuerung der PVF X



Mit Hilfe der Ausgleichsfunktionen von Abbildung 28 wurden die absoluten, prognostizierten Mehrerträge der vct-Steuerung gegenüber der astronomischen Steuerung der PVF X in kWh, aufgegliedert in die einzelnen Monate, errechnet. Die absoluten Mehrerträge der logarithmischen Ausgleichsfunktion sind durch blaue Balken beschrieben und die Mehrerträge der linearen Ausgleichsfunktion durch orangene Balken (eigene Abbildung).

Eidesstattliche Erklärung und Veröffentlichungserklärung

Eidesstattliche Erklärung und Veröffentlichungserklärung Student oder Studentin

Optimierung des Diffuslichtverhaltens einer Ost/West-Trackersteuerung am Beispiel der Photovoltaik-Freiflächenanlage in Harre (DK)

Eidesstattliche Erklärung Student oder Studentin

verfasst von: Herr **Tamschick** Lukas Sebastian

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem o.a. formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

[Redacted Signature]

Lukas Sebastian Tamschick

Erklärung zur Veröffentlichung des Studenten oder der Studentin

Ich bin mit der Online-Veröffentlichung der oben genannten Abschlussarbeit auf dem Dokumentenserver der HAW Hamburg **nicht einverstanden**.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich obige Angaben und dass ich die Richtlinien zur Veröffentlichung von Abschlussarbeiten der HAW Hamburg zur Kenntnis genommen habe und akzeptiere. Zu finden im Downloadbereich Fakultätsservicebüro Life Sciences, dort unter den Downloads des jeweiligen Studiengangs.

[Redacted Signature]

Unterschrift

Lukas Sebastian Tamschick