

Kettenfahrzeug mit automatischem Lichtnachführungssystem

Felix Grimm, Elektromobilität
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kurzfassung— Im Rahmen des Projektseminars Elektrotechnik/Informationstechnik soll ein Fahrzeug mit automatischer, sensorgesteuerter, zweiachsiger Nachführung konstruiert werden, dass sich damit selbständig in Richtung der Sonne ausrichten kann. Dies ermöglicht einer Photovoltaikanlage, beispielsweise auf einem Rover, eine möglichst effiziente Stromerzeugung. In dieser Arbeit wird die Idee zur Umsetzung eines solchen Systems sowie die Realisierung mit Hilfe eines über MATLAB angesteuerten LEGO-Mindstorms-Sets beschrieben. Dabei ein Kettenfahrzeug entstanden, das sich sowohl auf der Stelle in die hellste Richtung ausrichten als auch den hellsten Ort auf einer Ebene selbständig ausfindig machen kann.

Schlagwörter— Automatisierung, LEGO® MINDSTORMS®, MATLAB, Nachführungssysteme, Photovoltaik.

I. EINLEITUNG

PHOTOVOLTAIKANLAGEN spielen schon heute als erneuerbare Energiequelle eine wichtige Rolle bei der Stromerzeugung. Laut [1] stellen sie mit einer installierten Leistung von knapp 50 Gigawatt alleine in Deutschland den zweitgrößten Anteil bei der Stromerzeugung durch erneuerbare Energie-lieferungstechnologien dar. Die Installation von Photovoltaikanlagen als Privatperson ist zudem die einfachste und kostengünstigste Möglichkeit selbst Strom zu erzeugen und bietet gerade in Kombination mit einem eigenen Elektrofahrzeug viele Vorteile, sodass das Aufgreifen dieser Thematik in Bezug auf den Studiengang *Elektromobilität* durchaus Sinn ergibt. Elektrofahrzeuge können durch eingebaute Solarzellen ihre Reichweite signifikant erhöhen und die Kohlendioxid-Bilanz deutlich verbessern. Aber auch in anderen Anwendungsgebieten, wie bei Rovern oder Sonden, sind automatisierte Nachführungssysteme essentiell, da hier die Solarenergie oft die einzige Möglichkeit darstellt, diese über einen langen Zeitraum mit Strom zu versorgen. Außerdem ist eine manuelle Steuerung aufgrund der hohen Übertragungsverzögerungen hier oft nicht mehr möglich oder sinnvoll, sodass automatisierte Prozesse die manuelle Steuerung ablösen. Dementsprechend war es das Ziel dieses Projektes, ein Fahrzeug zu konstruieren, dass einerseits eigenständig den hellsten Ort auf einer Ebene suchen kann, um beispielsweise aus dem Schatten zu fahren, und sich andererseits auf der Stelle optimal ausrichten kann, ähnlich wie sich Sonnenblumen und andere Pflanzen in der Natur verhalten.

II. VORBETRACHTUNGEN

Unter astronomischer Nachführung versteht man in der Regel einen mechanischen Ausgleich der Erdrotation um die eigene Achse. In Bezug auf Photovoltaikanlagen bedeutet das, dass die Solarzellen stets optimal, also meistens senkrecht zur Sonne ausgerichtet sein sollten.

A. Stand der Technik

Fest montierte Solaranlagen ohne Nachführungssystem sind zwar weit verbreitet, doch auch Solaranlagen mit Nachführungssystemen sind keine Seltenheit, da sie einige Vorteile bieten. So können laut [2] nachgeführte Anlagen den Ertrag um etwa 35 Prozent steigern. Bei solchen Nachführungssystemen unterscheidet man einerseits zwischen sensorgesteuerter und astronomischer Nachführung und andererseits zwischen einachsiger und zweiachsiger Nachführung. Einachsige Nachführungssysteme können sich lediglich um die horizontale oder vertikale Achse drehen, während zweiachsige sich um beide Achsen drehen können. Bei einer astronomischen Nachführung ist die Bewegung der Anlagen bereits fest einprogrammiert, da der Verlauf der Sonne im Verlauf des Tages sowie die Veränderung im Laufe des Jahres bekannt ist. Somit richten sich diese Solaranlagen immer senkrecht zur Sonne aus, obwohl diese Position nicht immer optimal ist. Hierin liegt der Vorteil von sensorgesteuerten Nachführungssystemen. Diese können nämlich die optimale Position durch Helligkeitsmessungen herausfinden und so die Anlagen dementsprechend ausrichten. Das ist vor allem an bewölkten Tagen von großem Vorteil. An Tagen mit stark wechselnder Bewölkung kann so der Ertrag gemäß [3] um bis zu 70 Prozent gesteigert werden.

B. Idee zur Umsetzung einer sensorgesteuerten Nachführung

Im Folgenden wird eine recht einfache Möglichkeit zur Umsetzung einer sensorgesteuerten, zweiachsigen Nachführung auf einem Kettenfahrzeug beschrieben. Die Drehung um zwei Achsen lässt sich sehr einfach realisieren. Für die Drehung um die vertikale Achse kann man einfach das Kettenfahrzeug an sich auf der Stelle drehen. Dafür werden zwei Motoren benötigt, die jeweils eine Kette antreiben. Ein dritter Motor kann schließlich noch die Rotation um die horizontale Achse ermöglichen. Als Sensoren lassen sich für eine Drehachse zwei Fotowiderstände verwenden, deren Widerstand mit zunehmender Helligkeit geringer wird. Die beiden Widerstände müssen dabei

auf einer zur Drehachse senkrechten Ebene liegen (siehe Abbildung 1). Für zwei Achsen benötigt man also entweder vier Fotowiderstände oder zwei Fotowiderstände, die sich um 90° drehen können. Zeigen die Fotowiderstände in die gleiche Richtung, so kann man anhand der Widerstandsdifferenz feststellen, ob sie auf den hellsten Punkt zeigen. In diesem Fall sollte die Differenz beider Widerstände gleich Null sein. Natürlich würde das auch für den dunkelsten Punkt gelten, sodass man überprüfen muss, ob die Helligkeit einen gewissen Schwellenwert überschreitet. Ist die Differenz ungleich Null, so muss die Solarzelle solange in die Richtung des Sensors, der die höhere Lichtintensität misst, gedreht werden, bis beide die gleiche Intensität messen. Bei der Verwendung von vier Sensoren kann die Drehung in beide Achsen parallel stattfinden, bei zwei Sensoren nur nacheinander. Alternativ lässt sich die Erkennung des hellsten Punktes aber auch mit nur einem Lichtsensor realisieren. Dabei werden nacheinander, während des Drehens aufgenommene Helligkeitswerte miteinander verglichen. So lässt sich bestimmen, ob eine Drehung in eine bestimmte Richtung zu einer Erhöhung oder einer Senkung der Helligkeit führt. Ein einzelner Sensor kann jedoch keine genaue Aussage über die Ausrichtung im Stand treffen.

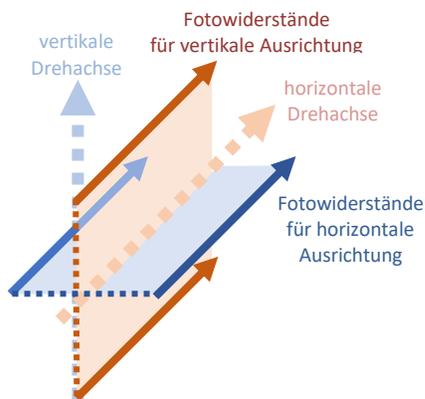


Abbildung 1: Anordnung von vier Fotowiderständen für ein zweiachsiges Nachführungssystem

III. EIGENE UMSETZUNG DER IDEE

Im Rahmen des Projektseminars war es das Ziel, ein Kettenfahrzeug mit einem zweiachsigem Nachführungssystem zu konstruieren. Als Konstruktionsgrundlage diente das LEGO-Mindstorms-Set mit dem NXT als programmierbarem Steuerungscomputer. Zur Ansteuerung des NXT wurde die Programmiersoftware MATLAB in Verbindung mit einer an der RWTH Aachen erstellten Toolbox verwendet.

A. Realisierung der Idee mit LEGO-Mindstorms

Die Grundidee des zweiachsigem Nachführungssystem ist mithilfe des LEGO-Baukastens gut umzusetzen. Allerdings gilt dies nur für eine sensorgesteuerte Lösung mit einem einzigen Sensor, da im Baukasten lediglich ein Lichtsensor enthalten ist. Außerdem würden vier Sensoren alle Anschlüsse am NXT beanspruchen, sodass keine weiteren Sensoren hätten verbaut werden können. Für eine Lösung aus zwei Sensoren wären insgesamt mehr als drei Motoren nötig gewesen. Ein NXT hat jedoch nur die Möglichkeit, drei Motoren gleichzeitig

anzuschließen, sodass schließlich die Lösung mit einem einzigen Lichtsensor am sinnvollsten erschien.

Zudem sollte das Fahrzeug auch noch auf einer Ebene die hellste Stelle finden können, um so beispielsweise aus dem Schatten zu fahren. Für dieses Ziel ist eine automatische Kantenerkennung zur Ermittlung der Ebenengrenzen, z. B. der eines Tisches, nötig.

Zusätzlich zur automatisierten Ausrichtung sollte das Fahrzeug komplett manuell steuerbar sein, um notfalls eingreifen zu können. Um sowohl die Automatisierung als auch die manuelle Steuerung zu integrieren, empfiehlt sich das Erstellen einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI).

B. Konstruktion des Fahrzeuges

Die Konstruktion des Fahrzeuges ist recht einfach. Zwei Motoren treiben zwei Räder an, die über eine Kette mit zwei weiteren Rädern verbunden sind. Der Aufbau erfolgte symmetrisch, um zu verhindern, dass bei gleicher Leistung der Motoren die Drehzahlen variieren. Eine dynamische Leistungsanpassung der Motoren an eine bestimmte Drehzahl wäre zwar möglich gewesen, würde aber aufgrund der recht unpräzisen LEGO-Motoren ziemlich ungenau sein. Vorne am Fahrzeug befindet sich ein Ultraschallsensor, der fest verbaut stets senkrecht nach unten zeigt. Dieser dient dem Kantenerkennungsalgorithmus und ermöglicht es so dem Fahrzeug, eine Ebene selbständig abzufahren. Der Lichtsensor sitzt auf einem rechteckigen Gestell, welches eine potenzielle Solarzelle darstellen soll. Ein dritter Motor ist dafür zuständig, diesen Rahmen mitsamt dem Lichtsensor vertikal zu drehen. Da der Lichtsensor auf diesem Gestell angebracht ist, dreht er sich nicht nur um die horizontale Achse, sondern bewegt sich außerdem auf einer Kreisbahn etwas in vertikaler Richtung. Die Bewegung des Lichtsensors ist also an die Bewegung der Solarzelle gebunden, was etwaige Verschattungen des Sensors durch die Solarzellen, gerade bei niedrigem Sonnenstand, verhindern kann.

Die fertige Konstruktion des Kettenfahrzeuges mit den Sensoren ist in Abbildung 2 zu sehen.



Abbildung 2: Konstruktion des Kettenfahrzeuges

C. Grafische Benutzeroberfläche

Mit Hilfe der grafischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 3) lässt sich das Fahrzeug komplett manuell steuern und die automatischen Ausrichtungsfunktionen können per Knopfdruck aktiviert werden.

Für die manuelle Steuerung gibt es sechs Befehlsknöpfe, mit denen man das Fahrzeug geradeaus und rückwärts fahren sowie nach links oder rechts drehen lassen kann. Rechts davon sind drei Eingabefenster zur Anpassung der Parameter für die manuelle Steuerung. Die *Länge* gibt den Motoren ein bestimmtes Tacholimit für das Geradeausfahren und das Rückwärtsfahren vor, der *Winkel* gibt an, wie weit sich das Fahrzeug nach links oder rechts drehen soll (in Gradzahlen) und die *Power* gibt die Leistung der Motoren von 0 bis 100 Prozent an. Während Power und Tacholimit direkte Parameter sind, die an den NXT und an die Motoren übermittelt werden können, wird das übergebene Tacholimit eines bestimmten Winkels für jeden Motor vorher erst durch eine Funktion berechnet und dann erst übergeben.

Unterhalb der Kontrollknöpfe befinden sich zwei Graphen, die während der manuellen Steuerung die Drehzahl aller drei Motoren oder die Lichtintensität im zeitlichen Verlauf in Echtzeit darstellen können. Während die Drehzahldarstellung hauptsächlich aus Debugging-Gründen implementiert wurde, kann die grafische Darstellung der Lichtintensität auch genutzt werden, um manuell eine optimale Position des Fahrzeuges zu finden. Das Darstellen der beiden Graphen kann jeweils durch einen *Switch-Schalter* unterhalb der Graphen aktiviert oder deaktiviert werden. Der darunter befindliche Kantenerkennungsknopf ist ein *Toggle-Knopf* und aktiviert bzw. deaktiviert die automatische Kantenerkennung durch den Ultraschallsensor.

Die drei linken Knöpfe oberhalb der Graphen dienen der Aktivierung der einzelnen automatischen Ausrichtungsfunktionen. Der rechts davon befindliche Reset-Knopf setzt die vertikale Position des Lichtsensors (und der Solarzelle) wieder zurück.

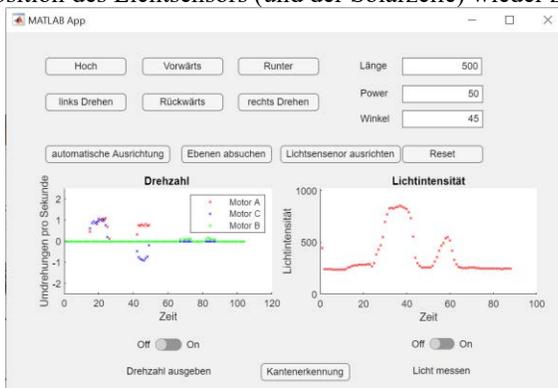


Abbildung 3: Grafische Benutzeroberfläche

D. Programmablauf der automatischen Ausrichtung

Der erste Schritt bei der optimalen, automatischen Ausrichtung ist das Absuchen einer Ebene. Der entsprechende Algorithmus ist auch der komplexeste. Da es viel zu lange dauern würde, jede Position auf einer Ebene abzufahren, fährt das Fahrzeug lediglich auf zwei senkrecht zueinander verlaufenden Strecken. Zu Beginn fährt das Fahrzeug von einer beliebigen Position aus geradeaus, bis es eine Kante erkennt. Die Kantenerkennung erfolgt über den Ultraschallsensor. Aus zehn Messwerten wird der Durchschnitt gebildet, um zufällige Fehler zu

vermeiden. Messwerte von 255, dem maximalen Distanzwert, werden dabei sogar komplett ignoriert, da sie verhältnismäßig häufig auftraten und selbst den Durchschnitt von zehn Messwerten stark verfälschten. Überschreitet der Durchschnittswert einen gewissen Schwellenwert, stoppt das Fahrzeug sofort, fährt etwas zurück und dreht sich um 180° . Nun bekommt das Fahrzeug wieder den Befehl geradeaus zu fahren und der Lichtsensor wird geöffnet. In regelmäßigen Abständen wird der Lichtwert in einem Array abgespeichert. Gleichzeitig wird auch die Motorposition, d. h. die Drehungsanzahl in Grad seit Beginn, in einem separaten Array abgespeichert. Erreicht das Fahrzeug nun erneut eine Kante, so hält es wieder an, fährt ein wenig zurück und dreht sich um 180° . Außerdem wird die Bestimmung von Licht- und Positionswerten gestoppt. Jetzt wird der Index des maximalen Lichtwertes ermittelt. Berechnet man nun die Differenz aus dem letzten Positionswert mit dem Positionswert des maximalen Lichtwertes, so erhält man das Tacholimit bis zu der Position, an der der hellste Lichtwert gemessen wurde. Bis zu dieser Stelle fährt das Fahrzeug nun und dreht sich dort um 90° nach rechts. Nun fährt es wieder bis zu einer Kante, wendet dort und misst, während es wieder bis zur nächsten Kante geradeausfährt, das Licht und speichert die Motorposition ab. Genau wie beim ersten Mal werden die Arrays ausgewertet und die Rückkehrposition bestimmt. Dort angekommen hat das Fahrzeug eine vermutlich optimale Position auf der Ebene gefunden, wo es nun stehen bleiben kann. Diese Methode ist natürlich nicht perfekt und kann, gerade bei mehreren Lichtquellen, durchaus fehleranfällig sein. Allerdings stellt sie einen guten Kompromiss aus Zuverlässigkeit und Zeitaufwand dar.

Angekommen an der optimalen Position auf der Ebene kann nun die horizontale Ausrichtung beginnen. Dafür dreht sich das Fahrzeug einmal um 360° und misst dabei wieder in regelmäßigen Abständen das Licht und speichert die Werte in einem Array ab. Auch die Motorpositionen werden wieder parallel abgespeichert. Nach der Drehung werden die Arrays erneut ausgewertet und das Fahrzeug dreht sich bis zur hellsten Stelle zurück.

Nun folgt schlussendlich noch die vertikale Ausrichtung des Lichtsensors. Das Prinzip ist wieder das gleiche wie zuvor. Das Gestell wird zusammen mit dem Lichtsensor nach unten geneigt, während der Lichtsensor in regelmäßigen Abständen Werte aufnimmt und abspeichert. Gleichzeitig wird wieder die Position des Motors abgespeichert, sodass sich der Motor erneut soweit nach oben bewegt, bis der Punkt erreicht wird, an dem der Sensor die größte Lichtintensität gemessen hat. Die Schwierigkeit bei der vertikalen Ausrichtung lag darin, dass sich der Motor beim Neigen des Lichtsensors um einen bestimmten Winkel dreht. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Ausgangspunkt des Lichtsensors soweit wie möglich nach hinten gedreht ist. Würde er weiter vorne starten, so würde das Kabel des Lichtsensors irgendwann nicht mehr lang genug sein. Der Motor würde sich also nicht weiterdrehen können, weil das Kabel ihn daran hindert. Daher muss der Lichtsensor vorher stets zurückgesetzt werden. Dies geschieht jedes Mal beim Start des Programms oder manuell durch das Drücken des *Reset-Knopfes*, falls man den Lichtsensor vorher manuell bewegt hatte. Beim Zurücksetzen der vertikalen Position wird der Motor solange in eine Richtung gedreht, bis die Drehzahl des Motors Null ist. Die Drehzahl ist genau dann Null, wenn die

Bewegung des Lichtsensors durch das Zusammenstoßen mit dem NXT verhindert wird. Die Bestimmung der Drehzahl erfolgt über die zeitliche Veränderung der ausgelesenen Motorpositionen.

Der gesamte Ablauf der automatischen Positionsfindung auf einer Ebene ist vereinfacht noch einmal in einem Programmablaufplan im Anhang zu finden.

IV. ERGEBNISDISKUSSION

Während des Projektseminars ist es gelungen ein Fahrzeug zu konstruieren, dass sich sowohl auf der Stelle optimal zur Sonne ausrichten als auch auf der Ebene die optimale Position finden kann. Dieses zweiachsige, automatische Ausrichtungssystem wird vollständig mit nur einem Lichtsensor realisiert. Alternativ lässt sich die Helligkeit auch in Echtzeit grafisch darstellen, während das Fahrzeug manuell gesteuert wird.

Natürlich kamen während des Projektes auch Probleme auf, hauptsächlich bei der Programmierung. Die Ungenauigkeit des Ultraschallsensors führte zu Beginn häufig zu einer fälschlichen Kantenerkennung. Erst durch die Lösung, den Durchschnittswert zu bilden und die Ausgabe höchstmöglicher Distanzwerte zu ignorieren, funktionierte die Kantenerkennung sehr zuverlässig. Die Ansteuerung des NXT über eine Bluetooth-Verbindung stellte sich als weniger vorteilhaft als gedacht heraus. Zwar konnte eine Verbindung hergestellt und Befehle übermittelt werden, jedoch sorgte eine recht hohe Verzögerung dafür, dass Kanten zu spät erkannt wurden und Motoren nach Erreichen des Tacholimits zu spät gestoppt wurden, sodass die Drehung um einen bestimmten Winkel stark variierte. Auch mit einer Verbindung über USB war die Winkelgenauigkeit oft nicht sehr präzise. Selbst beim Geradeausfahren über längere Strecken fiel auf, dass das Fahrzeug nicht perfekt gerade fuhr.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Das entstandene Kettenfahrzeug kann sich, ähnlich wie moderne, sensorgesteuerte, zweiachsige Nachführungssysteme, optimal zur Sonne bzw. zum hellsten Punkt hin ausrichten. Weiterhin kann das Fahrzeug automatisch den hellsten Ort auf einer Ebene finden. Erreicht wird dies durch einen einzelnen Lichtsensor, der während der Bewegung Lichtwerte in einem Array zusammen mit den entsprechenden Motorpositionen abspeichert. Dadurch kann das Fahrzeug anschließend zu der Position der hellsten gemessenen Lichtintensität zurückkehren. Die automatische Kantenerkennung für das Absuchen einer Ebene erfolgt mit Hilfe des Ultraschallsensors, der stets den Abstand zum Boden misst.

In Zukunft könnte die automatische Ausrichtung ohne den Zwang realisiert werden, immer alle Strecken komplett abfahren bzw. sich immer vollständig drehen zu müssen. Wenn beispielsweise ein Helligkeitswert gemessen wird, der schon die maximale Lichtintensität darstellt, könnten nachfolgende Bewegungen abgebrochen werden. Zudem könnte ein Abbruch nachfolgender Bewegungen schon dann erfolgen, wenn die Helligkeitswerte mit zunehmender Bewegung sinken. Durch die Verwendung mehrerer Lichtsensoren wäre es außerdem möglich abzufragen, ob die aktuelle Ausrichtung optimal ist,

sodass das Fahrzeug automatisch eine neue Korrektur der Ausrichtung nur dann vornimmt, wenn es nötig ist. Des Weiteren ermöglichen mehrere Sensoren eine schnellere automatische Ausrichtung, da so die Drehung um zwei Achsen gleichzeitig ermöglicht wird. Durch die Verwendung eines Gyrosensors könnte auch die Genauigkeit beim Drehen um bestimmte Winkel sowie beim Geradeausfahren erhöht werden.

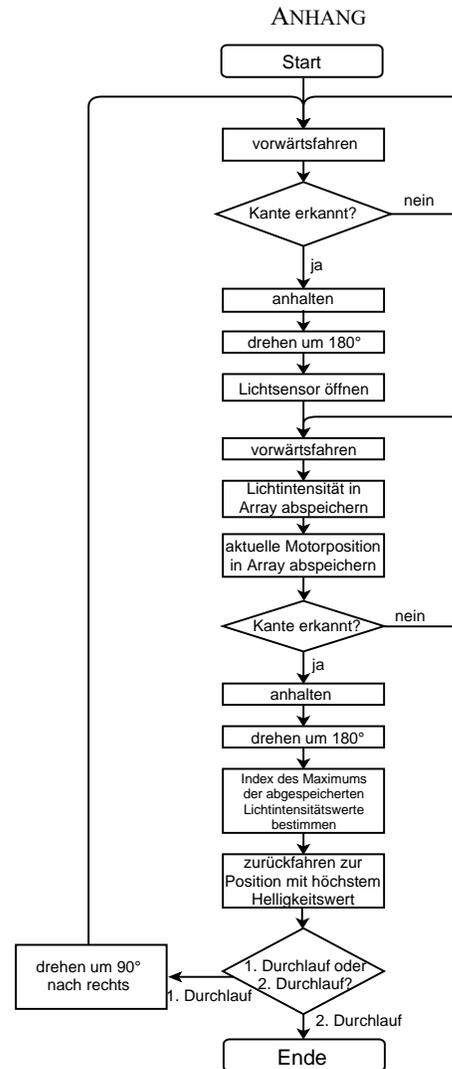


Abbildung 4: Programmablaufplan zur automatischen Ebenenabsuchung

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Umweltbundesamt, „Erneuerbare Energien in Zahlen,“ 18. Dezember 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>. [Zugriff am 2. März 2021].
- [2] C. Märtel, „Nachführungssystem für Solar,“ 9. November 2020. [Online]. Available: <https://www.solaranlagen-portal.com/solar/solares-bauen/nachfuehrsystem#:~:text=Damit%20durch%20Solar%20ein%20optimaler,die%20Effektivit%C3%A4t%20der%20Anlage%20steigt.> [Zugriff am 2. März 2021].
- [3] C. Märtel, „Vor- und Nachteile verschiedener Nachführungssysteme im Vergleich,“ 9. November 2020. [Online]. Available: <https://www.photovoltaiik-web.de/photovoltaik/dacheignung/solar-tracker-nachfuehrung-nachfuehrsysteme>. [Zugriff am 2. März 2021].