

Hannes PFUSTERSCHMID

David HOLZWEBER

Diplomarbeit

**an der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt
Francisco Josephinum
Abteilung Landtechnik
in Wieselburg**

Konzept für die Mechanisierung der Bewirtschaftung einer Agri-Photovoltaik- Anlage

eingereicht zum Haupttermin 2022 der Reife- und Diplomprüfung

**In Zusammenarbeit mit
RWA Solar Solutions GmbH, 2100 Korneuburg**

**Unter Betreuung von
DI Franz Handler
DI Markus Bauer**

**Eingereicht am
25.3.2022**

TEILTHEMEN DER DIPLOMARBEIT

Mechanisierung der Bewirtschaftung mit Ackerkulturen

Hannes Pfusterschmid

Betreuer/in:

DI Franz Handler und DI Markus Bauer

Mechanisierung der Bewirtschaftung mit Grünland

David Holzweber

Betreuer/in:

DI Franz Handler und DI Markus Bauer

AUFTEILUNG DER INHALTE

Vorname Nachname	Kap. Nr.	Kapitelüberschrift
David HOLZWEBER		Vorwort
David HOLZWEBER		Danksagung
Hannes PFUSTERSCHMID		Kurzfassung
Hannes PFUSTERSCHMID		Abstract
David HOLZWEBER	1	Einleitung
Hannes PFUSTERSCHMID	2	Landwirtschaftliche Produktionsverfahren
Hannes PFUSTERSCHMID	2.3	Bewirtschaftung mit Ackerkulturen
David HOLZWEBER	2.4	Bewirtschaftung mit Grünland
David HOLZWEBER	3	GPS/GNSS - Funktionsfähigkeit
Hannes PFUSTERSCHMID	4	Zusammenfassung und Ausblick

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort.....	8
Danksagung.....	9
Kurzfassung.....	10
Abstract.....	11
1 Einleitung.....	12
1.1 Agri-Photovoltaik-Anlage (Agri-PV).....	12
1.1.1 Verschiedene Bauweisen.....	12
1.1.2 Motivation für die Errichtung einer Agri-PV-Anlage.....	14
1.2 Anlagenstandort Pöchlarn.....	15
1.2.1 Ackerflächen (Klassische Agri-PV-Anlage).....	16
1.2.2 Ackerflächen (Nachgeführte Agri-PV-Anlage).....	16
1.2.3 Begrünung (Klassische Agri-PV-Anlage).....	17
1.2.4 Dauerkulturen (Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage).....	17
1.2.5 Andere Nutzung.....	18
2 Landwirtschaftliche Produktionsverfahren.....	19
2.1 Problemstellung.....	19
2.2 Material und Methode.....	19
2.3 Bewirtschaftung mit Ackerkulturen.....	19
2.3.1 Bereits verwendete Dimensionen.....	19
2.3.2 Vergleichssystem Agroforestry.....	21
2.3.3 Arbeitsgänge.....	22
2.3.3.1 Bodenbearbeitung.....	23
2.3.3.2 Saat.....	23
2.3.3.3 Düngung.....	24

Diplomarbeit

2.3.3.4	Pflanzenschutz	32
2.3.3.5	Ernte	34
2.3.3.6	Kulturspezifische Geräte.....	34
2.3.3.7	Relevante Geräte.....	35
2.3.3.8	Sicherheitsabstand	42
2.3.3.9	Gefahren.....	43
2.3.4	Wahl der Dimension der ackerbaulich genutzten Fläche	44
2.3.4.1	Günstige Reihenabstände	44
2.3.4.2	Wendeplatz.....	46
2.4	Bewirtschaftung mit Grünland.....	48
2.4.1	Nutzung als Weidefläche.....	48
2.4.2	Relevante Geräte für die Bewirtschaftung als Mähwiese	49
2.4.2.1	Mähwerk	49
2.4.2.2	Schwader.....	49
2.4.2.3	Zettkreisel	50
2.4.2.4	Ladewagen	51
2.4.2.5	Ballenpresse	51
2.4.2.6	Düngerstreuer/Güllefass	51
2.4.2.7	Mulcher.....	51
2.4.2.8	Mähroboter bzw. Mulchroboter	52
2.4.3	Wahl der Dimension der über Grünland genutzten Fläche	53
2.4.3.1	Günstige Arbeitsbreiten	53
2.4.3.2	Wendeplatz.....	53
2.4.3.3	Gefahren.....	54
3	Überprüfung der GNSS-Funktionsfähigkeit.....	56
3.1	Problemstellung.....	56

Diplomarbeit

3.2	Material und Methode	56
3.2.1	Bestimmung der Messpunkte	58
3.2.2	Zusammenbau des Messgerätes	59
3.2.3	Ackerflächen mit nachgeführter Agri-PV-Anlage	60
3.2.4	Ackerflächen mit klassischer Agri-PV-Anlage	61
3.2.5	Grünlandfläche mit klassischer Agri- PV-Anlage	62
3.3	Ergebnis	64
3.3.1	Ackerflächen mit mitführender Agri-PV-Anlage	66
3.3.2	Ackerflächen mit klassischer Agri-PV-Anlage	72
3.3.3	Grünlandfläche mit klassischer Agri-PV-Anlage	75
4	Schlussfolgerungen und Ausblick	78
5	Literaturverzeichnis	79
6	Abbildungsverzeichnis	87
7	Tabellenverzeichnis	89
8	Formelverzeichnis	91
9	Anhang	92

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.



Wieselburg, am 25.03.2022

Hannes PFUSTERSCHMID



Wieselburg, am 25.03.2022

David HOLZWEBER

Diplomarbeit

VORWORT

Die vorliegende Diplomarbeit mit dem Titel „Konzept für die Mechanisierung der Bewirtschaftung einer Agri-Photovoltaik-Anlage“ wurde am Francisco Josephinum (FJ) an der Abteilung Landtechnik in Zusammenarbeit mit der Fa. RWA Solar Solutions GmbH verfasst.

Nachdem wir uns zu einem Diplomarbeitsteam Mitte des zweiten Semesters in der vierten Klasse zusammengefunden hatten, kontaktierten wir die BLT Wieselburg, um ein Diplomarbeitsthema zu erhalten. Die BLT Wieselburg stellte uns ein interessantes und zukunftssträchtiges Thema zur Verfügung, welches wir mit Eifer und Neugier in Angriff nahmen.

Unsere Partnerfirma RWA Solar Solutions GmbH stellte uns mit Frau DI Sophia Melcher eine konzerninterne Betreuerin zur Verfügung, an die wir uns bei etwaigen Fragen bzw. Problemen wenden konnten.

Die Betreuer seitens des Francisco Josephinums wurden mit Herrn DI Markus Bauer und Herrn DI Franz Handler schnell gefunden.

Durch diese Diplomarbeit konnten wir unseren Wissensstand in den Bereichen der Agri-PV sehr gut erweitern und verbessern.

Wieselburg, März 2022

DANKSAGUNG

Hinter jeder schriftlichen Dokumentation stehen viele Arbeitsstunden und eine Vielzahl an Personen, welche dieses Projekt unterstützt oder sogar erst ermöglicht haben. An dieser Stelle möchten wir uns deshalb bei allen bedanken, die uns während der Durchführung unserer Diplomarbeit in allen möglichen Bereichen unterstützten.

Wir möchten uns hiermit sehr herzlich bei unseren beiden Betreuungslehrern, DI Markus Bauer und DI Franz Handler für Ihre Unterstützung bei der Ideenfindung, der Recherche, der Auswertung und beim Schreiben der Diplomarbeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt der BLT Wieselburg, welche uns dieses Thema und das benötigte Equipment für die GPS/GNSS-Versuche zur Verfügung stellte.

Herrn Moritz Jungwirth gebührt ein großer Dank, da er uns bei den GPS/GNSS-Versuchen geholfen hat und für unsere Fragen immer offen war.

Recht herzlich wollen wir uns auch bei der Firma RWA Solar Solutions GmbH bedanken, vertreten von Frau DI Sophia Melcher, die uns bei den GPS/GNSS-Versuchen betreut und uns die Agri-Photovoltaik-Anlage zur Verfügung gestellt hat.

Des Weiteren möchten wir uns bei allen anderen Mitwirkenden, welche uns immer mit einem offenen Ohr gegenüberstanden, recht herzlich bedanken.

Zu guter Letzt möchten wir uns bei unseren Eltern bedanken, welche uns diese Ausbildung erst ermöglicht haben.

KURZFASSUNG

Die vorliegende Diplomarbeit mit dem Titel „Konzept für die Mechanisierung der Bewirtschaftung einer Agri-Photovoltaik-Anlage“ beschäftigt sich mit den produktionstechnischen Schwierigkeiten der Bewirtschaftung einer Agri-Photovoltaik-Anlage. Der Auftraggeber dieser Diplomarbeit ist die Fa. RWA Solar Solutions GmbH.

Durch den ansteigenden Energieverbrauch sowohl als auch die Energiewende wird nach immer mehr erneuerbar produzierter Energie gefragt. Eine Art der Strom-Produktion erfolgt dabei durch das Aufstellen von Photovoltaik-Anlagen. Bei Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen besteht allerdings das Problem, dass dadurch landwirtschaftlich nutzbare Fläche verloren geht.

Um dieses Problem zu vermeiden, wird in den letzten Jahren häufig auf das Konzept einer Agri-Photovoltaik-Anlage hingewiesen, wo sich reihenweise Photovoltaik-Anlagen und dazwischen liegende landwirtschaftliche Fläche treffen.

Um die landwirtschaftliche Fläche effizient zu bewirtschaften können, ist es wichtig, ein passendes Konzept zur Bewirtschaftung sowie zur Dimensionierung zu wählen.

Zu Beginn dieser Diplomarbeit wurden häufig verwendete landwirtschaftliche Produktionsverfahren definiert und einzeln für die Verwendung in Agri-Photovoltaik-Anlagen, sowohl für Ackerflächen als auch für Grünland, evaluiert. Das Ergebnis dieser Evaluation ist ein Konzept zur Arbeitsbreitenwahl bei der Aufstellung einer solchen Anlage sowie zur passenden Wahl des Wendeplatzes.

Ebenfalls wurde die Funktionsfähigkeit von GNSS-Lenksystemen berücksichtigt. Diese wurde durch Versuche an der Testfläche in Pöchlarn bestimmt.

Die Diplomarbeit beinhaltet neben den Recherchearbeiten und der Marktanalyse auch die Beschreibung und die Beurteilung der durchgeführten GNSS-Tests.

ABSTRACT

The present diploma thesis is about the difficulties of management and production techniques of an agri-photovoltaic plant. This thesis was created in cooperation with RWA Solar Solutions GmbH.

Due to the increasing energy consumption as well as the energy turnaround, there is a demand for more renewably produced energy. One way of producing electricity is by setting up photovoltaic systems. However, the problem with ground-mounted photovoltaic systems is that they cause the loss of arable land.

To avoid this problem, the concept of an agri-photovoltaic system, where rows of photovoltaic systems meet with agricultural land in between, has been frequently referred to in recent years.

In order to manage the agricultural area efficiently, it is important to choose a suitable concept for the management as well as for the dimensioning.

At the beginning of this thesis, commonly used agricultural production methods were defined and evaluated individually for use in Agri-Photovoltaic systems, both for arable land and grassland. The result of this evaluation is a concept for the working width selection for the installation of such a plant as well as for the suitable choice of the turning place.

The functionality of GNSS guidance systems was also considered. This was determined by tests at the test area in Pöchlarn.

In addition to the research work and the market analysis, the diploma thesis also includes the description and the evaluation of the GNSS tests carried out.

1 EINLEITUNG

1.1 Agri-Photovoltaik-Anlage (Agri-PV)

Agri-Photovoltaik-Anlagen beschreiben die Doppelnutzung einer landwirtschaftlichen Fläche. Dabei bieten Agri-Photovoltaik-Anlagen weiterhin eine landwirtschaftliche Hauptnutzung und gleichzeitige Erzeugung von Solarstrom mithilfe von Photovoltaik-Anlagen. Dieses Prinzip wird erst seit ungefähr 2013 in einigen Ländern angewandt, aber es wurde bereits in den 1980er Jahren erstmals beschrieben. [59, S.5;15]

1.1.1 Verschiedene Bauweisen

Heutzutage gibt es viele technische Möglichkeiten für die Doppelnutzung einer landwirtschaftlichen Fläche. Welche Technologien bzw. Montagesysteme verwendet werden, hängt von den charakteristischen Eigenschaften der geplanten oder bereits vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzung ab. Andere wichtige Faktoren für die Auswahl der geeigneten Agri-Photovoltaik-Anlagebauweise sind die Intensität des Geräteeinsatzes, klimatische Gegebenheiten (wie zum Beispiel Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Windstärke) und die Größe des Feldes.

Entsprechend der DIN SPEC 91434:2021-05 lassen sich die Agri-Photovoltaik-Anlagen in zwei Kategorien unterteilen. [65; S.10;11]

Agri-PV-Systeme	Nutzung	Beispiele
Kategorie 1: Aufständigung mit lichter Höhe Bewirtschaftung unter der Agri- PV-Anlage	1A: Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
	1B: Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
	1C: Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, extensiv genutztes Grünland
	1D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide
Kategorie 2: Bodennahe Aufständigung Bewirtschaftung zwischen den Agri-PV-Anlagenreihen	2A: Dauerkulturen und mehrjährige Kulturen	Obstbau, Beerenobstbau, Weinbau, Hopfen
	2B: Einjährige und überjährige Kulturen	Ackerkulturen, Gemüsekulturen, Wechselgrünland, Ackerfutter
	2C: Dauergrünland mit Schnittnutzung	Intensives Wirtschaftsgrünland, extensiv genutztes Grünland
	2D: Dauergrünland mit Weidenutzung	Dauerweide, Portionsweide

Tabelle 1: Einteilung laut DIN SPEC 91434:2021-05 [65];[60]

1.1.2 Motivation für die Errichtung einer Agri-PV-Anlage

Agri-PV-Anlagen sind derzeit teurer als konventionelle Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA). Außerdem kann in einer Agri-PV-Anlage weniger Leistung pro Fläche installiert und produziert werden als bei konventionellen Photovoltaik-Freiflächenanlage. Zusätzlich wird durch die Montagesysteme die nutzbare landwirtschaftliche Fläche reduziert. Dieser Flächenanteil macht je nach Design acht bis fünfzehn Prozent der Agri-PV-Anlage aus. Aus wirtschaftlicher Sicht scheint es sinnvoller zu sein, Photovoltaik-Freiflächenanlagen und landwirtschaftliche Flächen nicht zu kombinieren, sondern diese getrennt voneinander zu nutzen. Deshalb sollten Agri-Photovoltaik-Anlagen nicht in erster Linie an Standorten etabliert werden, wo konventionelle Freiflächenanlagen installiert werden würden. Nach einem anfänglichen Boom der PV-FFA wurden in der Folge zunehmend Flächenregelungen eingeführt, um wertvolle landwirtschaftliche Flächen aufrechtzuerhalten. Aufgrund dieser Regelungen ist der derzeitige Bau von konventionellen Photovoltaik-Freiflächenanlage recht eingeschränkt. Agri-PV bietet Landwirten die Möglichkeit, landwirtschaftliche Flächen zu erschließen, ohne dabei die landwirtschaftliche Nutzung zu verhindern. Weiters können Agri-PV durch Verschattungseffekte oder den mechanischen Schutz der angebauten Kulturen die Pflanzenproduktion unterstützen. [59, S.6]

1.2 Anlagenstandort Pöchlarn

Die Agri-PV Versuchsfläche der Fa. RWA Solar Solutions GmbH liegt in der Nähe der Stadtgemeinde Pöchlarn in Niederösterreich. Auf diesem Versuchsfeld gibt es vier verschiedene PV-Anlagen-Typen.

1. klassische Agri-PV-Anlage mit Ackerflächen (2B)
2. nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Ackerflächen (2B)
3. klassische Agri-PV-Anlage mit Begrünung (2C, 2D)
4. hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage für Dauerkulturen (1A)

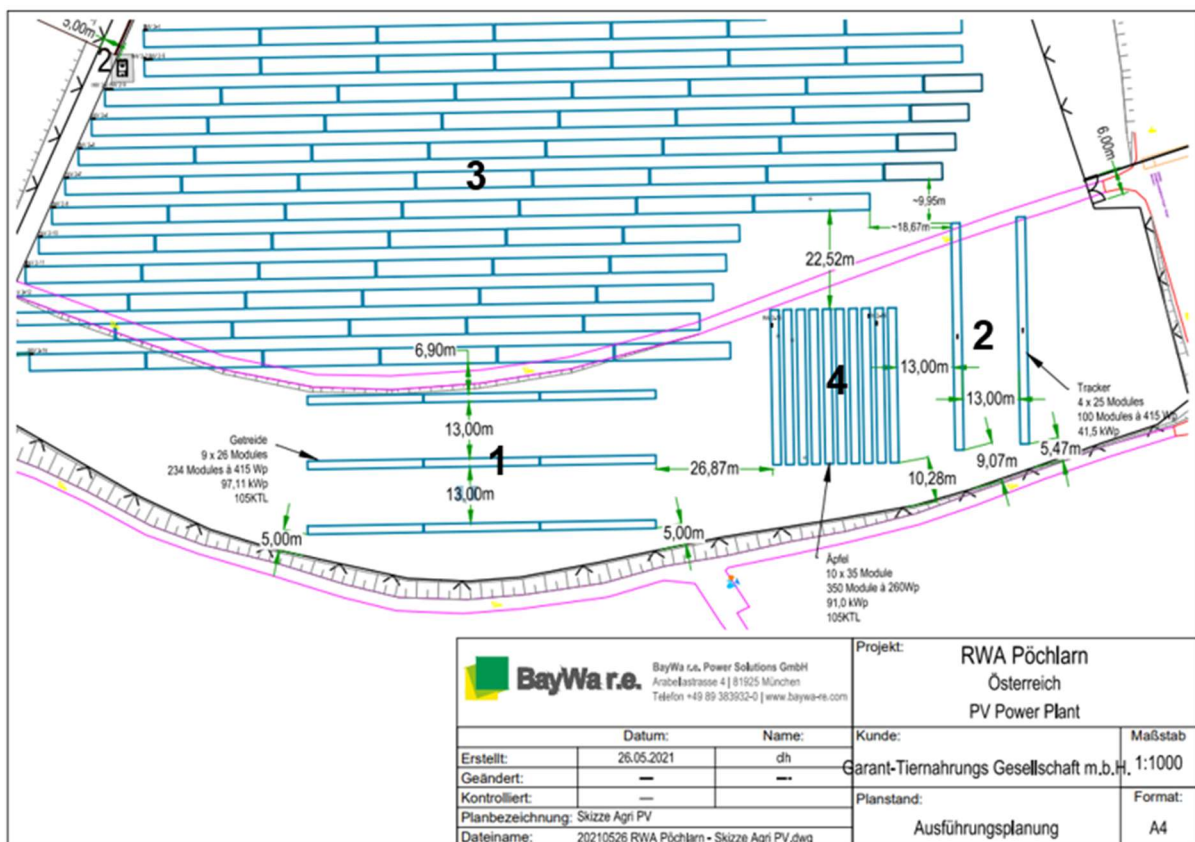


Abbildung 1: Anlagenplan [61]

Die Gesamtfläche des Versuchsfeldes beträgt circa 5,2 Hektar. Die Leistung der 10.044 PV-Module beträgt 4.090,61 kWp (Kilowatt Peak). Das entspricht einer jährlichen Produktion von rund 4.600.000 kWh (Kilowattstunden). Dadurch werden rund 1.629 t/Jahr oder 0,3543 kg/kWh CO₂-Emissionen vermieden.

1.2.1 Ackerflächen (Klassische Agri-PV-Anlage)

Die einstützige und fix nach Süden ausgerichtete Anlage ist parallel in bewirtschaftbaren Abständen (13 Meter) von Osten nach Westen angeordnet. Die Fläche unter den PV-Modulen wird als Blühstreifen genutzt. Bei diesem System kommt eine Flächenaufteilung von ungefähr 80% landwirtschaftliche Nutzung, 15% Blühstreifen und 5% Photovoltaik vor.



Abbildung 2: Klassische Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche (eigene Aufnahme)

1.2.2 Ackerflächen (Nachgeführte Agri-PV-Anlage)

Das einstützige System ist in parallel bewirtschaftbaren Abständen von Nord nach Süd angeordnet. Der PV-Tracker folgt dem Stand der Sonne von Osten nach Westen. Unter der PV-Anlage wird die Fläche als Blühstreifen genutzt. Dieses System hat den geringsten Flächenverlust mit 80% landwirtschaftliche Nutzung, 15% Blühstreifen und 5% Photovoltaik. Durch nahezu vertikaler Anwinkelung der Module (80° möglich) hat man eine maximale Feldausbeutung für die Bewirtschaftung.



Abbildung 3: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche (eigene Aufnahme)

1.2.3 Begrünung (Klassische Agri-PV-Anlage)

Die Grünfläche wird als Dauergrünland mit Weidenutzung für Schafe genutzt. Dabei wird das Areal der Weide in vier Abschnitte unterteilt. Auf einen der vier Abschnitte wird ein Zaun aufgestellt wo die Weidetiere gehalten werden. Nach einigen Wochen wird auf einem anderen Abschnitt eine neue Weidefläche abgesteckt, auf der die Tiere gehalten werden.



Abbildung 4: Klassische PV-Anlage mit Grünfläche (eigene Aufnahme)

1.2.4 Dauerkulturen (Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlage)

Unter der Anlage wird mit der Bepflanzung von Obstbäumen begonnen.



Abbildung 5: hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage mit Dauerkulturen (eigene Aufnahme)

Diplomarbeit

1.2.5 Andere Nutzung

Auf dem Versuchsfeld wurden bereits freiwachsende Biodiversitätshecken gepflanzt. Dafür wurden 14 Arten von heimischen Wildstrüchern aus der Region verwendet. Insgesamt kommt man dabei auf 330 Stück auf einer Länge von circa 220 Meter.

Weiters wird ein Teil des Areals für eine Blühfläche bzw. ausdauernden Blumenwiese genutzt.



Abbildung 6: Blühfläche (eigene Aufnahme)

2 LANDWIRTSCHAFTLICHE PRODUKTIONSVERFAHREN

2.1 Problemstellung

Eines der am leichtesten zu erkennenden Probleme liegt in der Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Fläche. Es ist wichtig, einen passenden Reihenabstand sowie eine passende Wendepplatzbreite zur einfachen und effizienten Bearbeitung bei der Aufstellung zu wählen. Ziel dieses Kapitels ist die Erstellung eines Konzeptes zur Dimensionierung und zur landwirtschaftlichen Bearbeitung verschiedener Agri-PV-Anlagen.

2.2 Material und Methode

Das Ergebnis wird vorwiegend durch Literaturrecherche bestimmt. Zur Recherche werden vorwiegend Internetressourcen verwendet. Die verwendeten Suchmaschinen sind Google und Google Scholar. Weiters werden auch Daten aus Literatur der Bücherei des Francisco Josephinums entnommen.

2.3 Bewirtschaftung mit Ackerkulturen

2.3.1 Bereits verwendete Dimensionen

Bereits durchgeführte Dimensionierungen geschahen größtenteils in Hinsicht auf pflanzenbauliche und photovoltaische Faktoren.

Laut TFZ-Bericht 73, welcher bereits bestehende Anlagen untersucht, wird bei einer beschriebenen nachführenden Anlage ein Reihenabstand von 14 Metern gewählt. Der Bericht beschreibt den gewählten Abstand als größer als bei herkömmlichen Freiflächenanlagen, da dadurch die Bewirtschaftung der Ackerfläche erleichtert wird. [59; S.23;31]

Bei vertikal aufgestellten Anlagen werden laut TFZ-Bericht Reihenabstände von 8 – 14 Metern empfohlen. [59; S.20]

Laut dem Artikel zur Optimierung vertikal aufgestellter Agri-PV-Anlagen der Universität Mälardalen und der Universität Cattolica del Sacro Cuore werden Reihenabstände zwischen 5 und 20 Meter in Erwägung gezogen, wobei fünf Meter als Mindestabstand zur Verwendung von konventionellen landwirtschaftlichen Geräten bedacht ist.

Diplomarbeit

Weiters ist angeführt, dass der ideale Reihenabstand, wobei pflanzenbauliche und photovoltaische Faktoren optimiert werden, abhängig von der verwendeten Kultur ist. Laut Berechnungen und Simulationen sei bei Kartoffel ein Reihenabstand von 8,5 Metern ideal. Bei Hafer sei der ideale Reihenabstand 9 Meter. Für eine optimale Dimensionierung werden weitere Simulationen und Einbindung der landwirtschaftlichen Produktionsverfahren empfohlen. [62; S.9; S.16-17]

Die nachfolgende Grafik (siehe Abbildung 7) stellt den Aufbau einer vertikalen aufgestellten Agri-PV-Anlage schematisch dar, wobei auch die ertragsmindernde Beschattung der PV-Flächen dargestellt ist. [62; S.7]

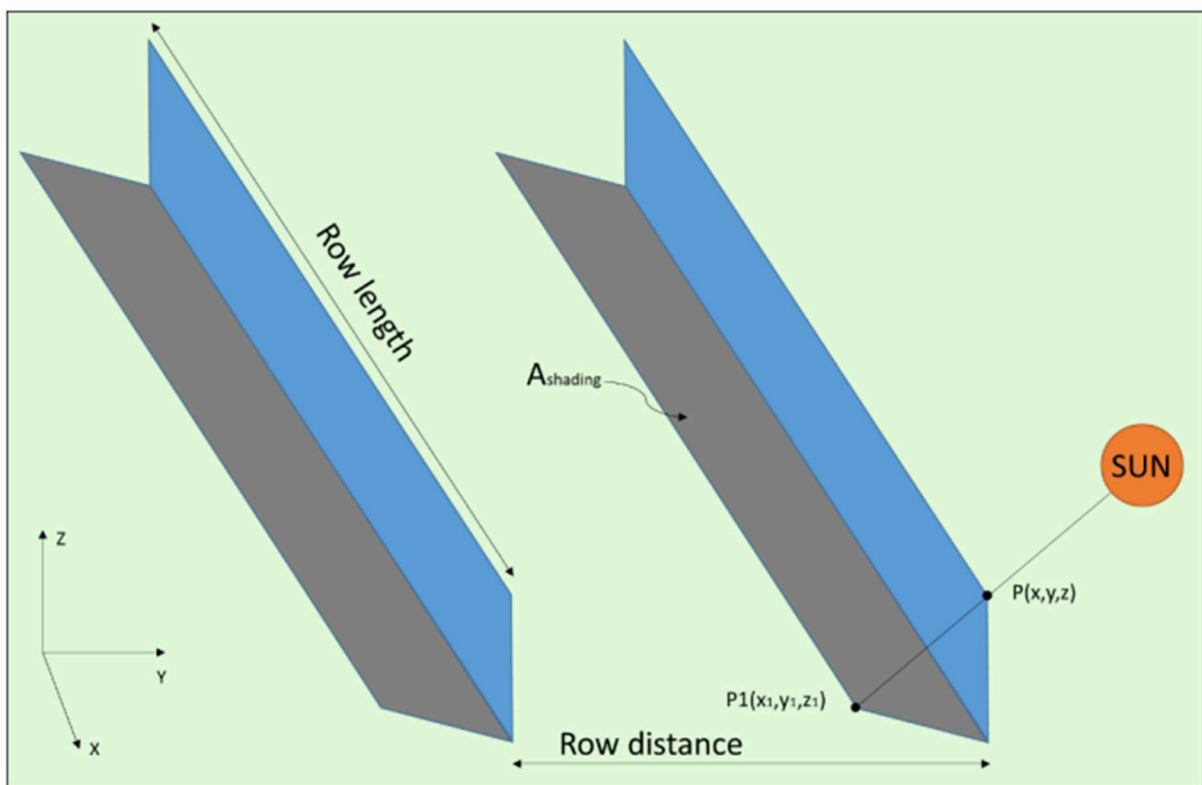


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer vertikal aufgestellten Anlage mit Darstellung der Beschattungsfläche. [62; S.19]

In einem Artikel des Journal of Scientific & Engineering Research wird für die Analyse einer klassischen Agrivoltaik-Anlage ein Abstand innerhalb der Photovoltaik-Platten von 6 Metern gewählt. Dabei ist die Ackerbreite innerhalb mit 5 Metern dimensioniert. Die Anlage verfügt somit über einen beidseitigen Abstand der Ackerfläche von der Anlagenkante von 0,5 Metern. [7; S.129]

Diplomarbeit

Die nachfolgende Grafik stellt eine klassische Agrivoltaik-Anlage dar. [7; S.128]

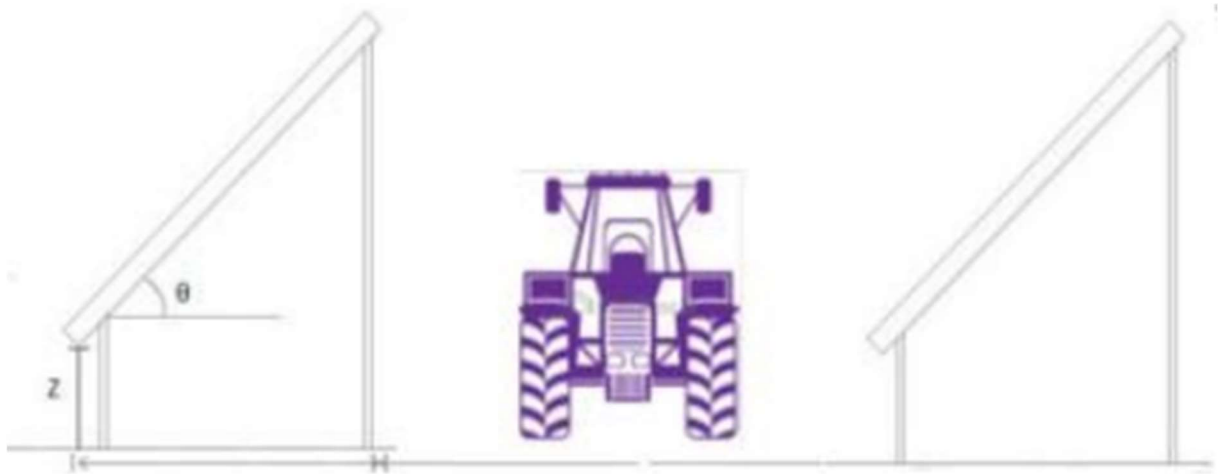


Abbildung 8: Darstellung einer hoch aufgeständerten Agrivoltaik Anlage [7; S.128]

2.3.2 Vergleichssystem Agroforestry

In einigen Ausführungen von Agroforestry-Anlagen lassen sich Ähnlichkeiten in der Bewirtschaftung zu einer Agri-Photovoltaik-Anlage erkennen. Besonders die reihenweise Bewirtschaftung der Ackerfläche zwischen den Baumreihen ist für diesen Vergleich relevant.

Konkrete Dimensionen lassen sich nicht übernehmen, da durch die Größe der Bäume der Schattenwurf erhöht ausfällt. Um dadurch entstehende Ertragsminderungen zu minimieren, werden in der Agroforestry die Reihenabstände größer gewählt.

Allerdings lässt sich die Philosophie der Arbeitsbreitenbestimmung auch an Agri-Photovoltaik-Anlagen anwenden.

Laut Berichten der Universität Freiburg werden als Ackerbreite 24 Meter oder ein Vielfaches davon empfohlen, wobei darauf hingewiesen wird, dass sich der Reihenabstand der Baumreihen und somit die Ackerbreite an die Arbeitsbreite der verwendeten Geräte anpassen soll. Es sollen möglichst keine Mehrfahrten entstehen.

Die nachfolgende Grafik (siehe Abbildung 8) stellt eine Agroforestry-Anlage dar, wobei eine Ackerbreite von 24 Metern und eine Grünstreifenbreite von 2 Metern gewählt sind. [58; S.17] [57; S.119]

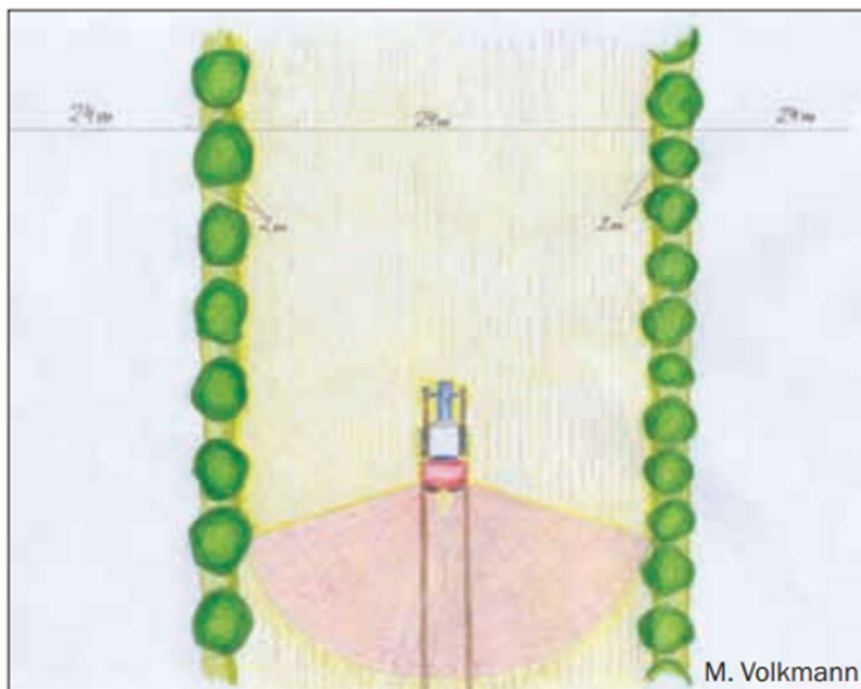


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Agroforestry-Anlage, wobei hier der Reihenabstand als an die Arbeitsbreite des größten Geräts angepasst dargestellt ist. [58; S.17]

Laut ART-Bericht 725 ergab eine Befragung von Landwirten eine Mindestackerbreite von 12 Metern. Empfohlen wird, unter Berücksichtigung eines Grünstreifens von 2 Metern bei Werthölzern, ein Reihenabstand mit 14 Meter oder mit 26 Meter. Allerdings wird erwähnt, dass sich der Reihenabstand an die Arbeitsbreite der verwendeten Geräte anpassen soll. Es sollen breite Geräte gut zwischen den Reihen hindurch fahren können, wobei die Ackerbreite ein Vielfaches der Arbeitsbreite der kleineren Geräte sein soll, um Mehrfahrten zu vermeiden. Die Arbeitsbreite kann aber auch entscheidend größer gewählt werden, falls auch zukünftig noch Ackerbau auf dieser Fläche geplant ist. Als Beispiel ist ein 40 Meter Reihenabstand erwähnt. [56; S.3-4]

Abschließend lässt sich sagen, dass einer der entscheidendsten Faktoren zur Bestimmung des Reihenabstandes die Arbeitsbreite der zu verwendenden Geräte ist.

2.3.3 Arbeitsgänge

In den folgenden Kapiteln werden landwirtschaftlich eingesetzte Produktionsverfahren aufgelistet und beschrieben.

Grundsätzlich lassen sich die landwirtschaftlichen Produktionsverfahren im Ackerbau in fünf grundlegende Arbeitsgänge unterteilen:

Diplomarbeit

- Bodenbearbeitung
- Saat
- Düngung
- Pflanzenschutz
- Ernte

2.3.3.1 Bodenbearbeitung

In der Bodenbearbeitung kann zwischen zwei Arbeitsgängen unterschieden werden:

- Grundbodenbearbeitung
- Saat- und Pflanzenbettbereitung

Die Grundbodenbearbeitung dient hauptsächlich der Aufbrechung des Bodens sowie der Einarbeitung organischer Reste. Dies kann entweder wendend oder nicht wendend erfolgen. Wendende Grundbodenbearbeitung wird als konventionell bezeichnet, und erfolgt überwiegend mit einem Pflug. Nicht wendende Grundbodenbearbeitung wird dagegen als konservierend bezeichnet, und erfolgt häufig mit Grubber. [1, S.79-94]

Die Saat- und Pflanzenbettbereitung dient der Bereitung des Bodens auf die darauffolgenden Kulturen und Prozesse. Sie ist unter anderem für die oberflächliche Krümelbildung sowie der Einebnung des Bodens zur Erleichterung der folgenden Bearbeitung zuständig. Häufig verwendete Geräte zur Saat- und Pflanzenbettbereitung sind Zinkengeräte, Eggen, Walzen, Packer und Bodenfräsen. [1; S.94-102]

Erwähnenswert ist hier auch die Direktsaat. Hierbei erfolgt die Saat ohne vorhergehende Bodenbearbeitung.

[1; S.77-119]

2.3.3.2 Saat

Die Saat bezeichnet den Prozess, durch welchen die Pflanzensamen auf das Feld verteilt werden. Diese Verteilung erfolgt meist reihen- oder bandweise, wobei die Reihen- und Bandabstände von der verwendeten Maschine abhängig sind. Für den nachfolgenden Pflanzenschutz werden Fahrgassen angelegt. [1; S.144]

Diplomarbeit

Viele Sämaschinen sind auf die Verwendung für mehrere Kulturen und Kulturarten ausgelegt. Spezielle Kulturen erfordern spezielle Sä-Verfahren, da sich die idealen Ablagebedingungen und Reihenabstände ändern.

[1; S.120-149]

2.3.3.3 Düngung

Die Düngung erfolgt zur Kompensation von zu wenig vorhandenen Nährstoffen und zur Pflanzenwachstums- und Ertragsförderung. Es kann zwischen einigen Arten von Düngemittel unterschieden werden:

- Mineraldünger
- Feste organische Dünger
- Flüssige organische Dünger

Bei festen mineralischen Düngemitteln kann zwischen zwei Arten der Ausbringung unterschieden werden:

- Wurfstreuer (Schleuderstreuer)

Wurfstreuer funktionieren über eine zentrale Streueinheit, welche das Düngemittel durch Wurf über die Feldbreite verstreut. Aufgrund der zentralen Streueinheit ist die Querverteilung und somit das Streubild nicht gleichmäßig. Es ist deswegen ohne Überlappung der Arbeitsbreiten keine annähernd gleichmäßige Querverteilung möglich. [1; S.153] [5; S.216-217]



Abbildung 10: Wurfverteiler der Firma Kverneland [4]

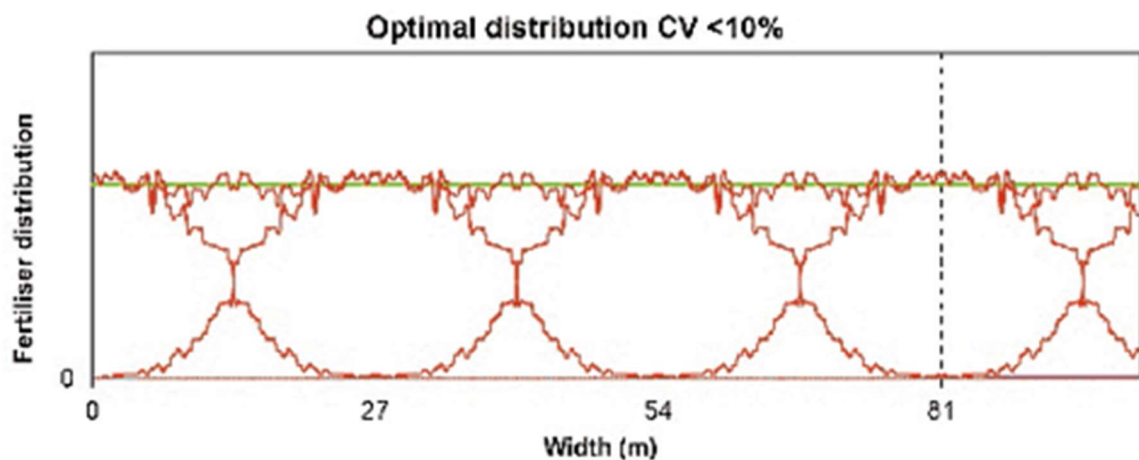


Abbildung 11: Querverteilung eines Wurfstreuers von Kverneland [4]

Diplomarbeit

– Auslegerstreuer (Exaktstreuer)

Auslegerstreuer verteilen das Düngemittel ohne Wurf über die Arbeitsbreite. Die Verteilung geschieht dabei innerhalb des Auslegers mechanisch oder pneumatisch. Dadurch ist die Arbeitsbreite streng abhängig von und ungefähr gleich der Auslegerbreite. Auch ist durch die Verteilung im Ausleger die Querverteilung gleichmäßig. Bei Schneckenstreuern und Pneumatikstreuern sind nur geringe bis keine Überlappungen notwendig. [1; S.157] [5; S.217]



Abbildung 12: Auslegerstreuer der Firma BREDAL [50]

Diplomarbeit

Flüssige mineralische Düngemittel werden in der Regel mit Feldspritzen ausgebracht, wobei andere Spritzdüsen oder Schleppschräume verwendet werden. Die Verteilung ist vergleichbar mit der eines Auslegerstreuers.

[1; S.150-159]



Abbildung 13: Feldspritze der Firma AMAZONE [25]

Diplomarbeit

Organischer Festmist wird üblicherweise durch ein zentrales Streuwerk ausgetragen, allerdings sind die Streubreiten in der Regel geringer als bei mineralischen Düngern. Es kann zwischen zwei verschiedenen Arten unterschieden werden:

- Vertikale Walzen

Festmist-Streuer mit vertikalen Walzen besitzen über eine relativ große Streubreite. Laut *Lehrbuch des Pflanzenbaus – Band 2: Kulturpflanzen* sind Streubreiten von 10 – 15 Metern üblich. Arbeitsbreiten liegen damit bei bis zu 6 Meter. Mit zusätzlichen Verteilerscheiben kann die Querverteilung verbessert werden und die Arbeitsbreite auf 12 Meter erhöht werden. Zur idealen Querverteilung muss überlappend gefahren werden. [1; S.160]



Abbildung 14: Dungstreuer mit vertikalen Walzen der Firma BERGMANN

Diplomarbeit

– Horizontale Walzen

Festmist-Streuer mit horizontalen Walzen verfügen über eine geringe Streubreite. Laut *Lehrbuch des Pflanzenbaus – Band 2: Kulturpflanzen* sind Streubreiten von 2,5 – 4 Metern üblich. Damit besitzen sie eine Arbeitsbreite von 2 – 2,5 Metern. [1; S.160]

Durch die geringe Streubreite sind die Konsequenzen bei nicht überlappendem Fahren gering, allerdings muss Spur an Spur gefahren werden. Der damit verbundene Arbeitsaufwand ist somit größer.

[1; S.159-160]



Abbildung 15: Dungstreuer mit horizontalen Walzen

Diplomarbeit

Organischer Flüssigmist kann, ähnlich dem Mineraldüngerstreuer, in zwei Arten der Ausbringung unterteilt werden.

- Wurfverteiler / Breitverteiler

Bei Wurfverteilern erfolgt die Verteilung über ein zentrales Streugerät. Dadurch ist die Querverteilung ungleichmäßig, und muss durch Überlappung kompensiert werden.



Abbildung 16: Güllestreuer mit schleudernder Ausbringung der Firma ZUNHAMMER

Diplomarbeit

- Auslegerverteiler / Zwangsverteiler

Die Verteilung erfolgt innerhalb des Gerätes auf einzelne Schläuche. Der Dünger wird danach bodennah ausgebracht. Dadurch ist die Querverteilung genauer, und somit auch keine Überlappung notwendig. Typisch sind sogenannte Schleppschlauch-, Schlepschuhverteiler oder Injektoren bzw. Schlitzgeräte.

[1, S.160-164]



Abbildung 17: Güllefass mit Schleppschlauchverteiler der Firma FARMTECH

Diplomarbeit

2.3.3.4 Pflanzenschutz

Pflanzenschutz beschreibt Verfahren, welche die Kultur vor Krankheiten und konkurrierenden Pflanzen schützen. Neben Fruchtfolgewahl und Saatgutbeizung wird Pflanzenschutz auf zwei verschiedenen Arten ausgeübt:

- Chemischer Pflanzenschutz
- Physikalischer Pflanzenschutz

Chemischer Pflanzenschutz erfolgt meist durch das Ausbringen von flüssigen Pflanzenschutzmitteln über eine Feldspritze. Feldspritzen verteilen die Pflanzenschutzmittel über Ausleger. Es ist keine Überlappung notwendig. Laut *Lehrbuch des Pflanzenbaus – Band 2: Kulturpflanzen* sind Feldspritzen mit Arbeitsbreiten von 12 bis 27 Meter im Ackerbau üblich. [1, S.176]



Abbildung 18: Feldspritze der Firma AMAZONE [26]

Diplomarbeit

Physikalischer Pflanzenschutz ist vor allem in der ökologischen Landwirtschaft von Bedeutung. Er erfolgt zum Beispiel mit Striegel, Hacken oder Eggen. Das Unkraut wird dabei mechanisch zerstört, ohne die Hauptkultur zu schädigen. Laut *Lehrbuch des Pflanzenbaus – Band 2: Kulturpflanzen* sind Arbeitsbreiten bis 24 m üblich. [1; S.180]



Abbildung 19: Ackerstriegel der Firma APV [13]

Die Arbeitsbreiten der Pflanzenschutzgeräte sind schon bei der Saat ein ausschlaggebender Faktor, denn sie entscheiden über die erforderlichen Fahrgassen. Es werden üblicherweise Sämaschinen und Pflanzenschutzgeräte aneinander angepasst gewählt, damit sich die Wahl der Fahrgassen immer auf dieselben Sä-Reihen der Sämaschine bezieht. [1; S.144]

[1; S.172-181]

2.3.3.5 Ernte

Die Ernte erfolgt je nach Kultur unterschiedlich. Bei den meisten Kulturen werden selbstfahrende Mähdrescher eingesetzt, welche durch eine Schneidvorrichtung die Pflanze schneiden und intern das Gut dreschen. Bei Getreidearten wird vorwiegend dasselbe Schneidwerk verwendet, wobei bei Mais eine eigene Vorrichtung üblich ist. Bei anderen Kulturen, wie zum Beispiel Raps oder Sonnenblumen, werden ebenfalls eigene Schneidwerke verwendet. Der Mähdrescher wird oft während der Fahrt durch eine seitliche Anlage in ein nebenbei fahrendes Traktor-Anhänger-Gespann entleert.

[1; S. 182-223]

2.3.3.6 Kulturspezifische Geräte

Die oben genannten Verfahren und Geräte werden in der geläufigen Landwirtschaft mit häufigen Kulturen verwendet.

Bei Spezial-Kulturen, wie Rüben und Kartoffeln, werden eigene Geräte für die Saat und für die Ernte verwendet. Es ergibt sich als notwendig, diese Geräte bei der Auswahl der Anlagendimensionen zu berücksichtigen, oder Geräte zu wählen, welche in der Arbeits- und Maschinenbreite mit anderen verwendeten Sämaschinen und Erntemaschinen konform sind.

2.3.3.7 Relevante Geräte

Viele Geräte sind für die Auswahl des Reihenabstandes trivial, sie müssen nicht individuell berücksichtigt werden. In der Regel werden viele Geräte kombiniert ausgewählt, so fallen zum Beispiel Egge und Sämaschine oft als Kombination aus und sind dementsprechend in der Arbeitsbreite und Spur-Wahl ident. Andere Maschinen sind in der Arbeitsbreite verhältnismäßig klein ausgeführt, es kommt somit zu geringer Mehr-Arbeit bei Überlappung der Arbeitsbreiten. Sie sind somit für die Auswahl des Reihenabstandes irrelevant.

Jedoch kommt es bei manchen Geräten zu Nebeneffekten, welche sich auf die Nutzbarkeit in einer Agrivoltaik-Anlage auswirken können.

Im Fazit lässt sich erkennen, dass die Zwänge und Auswirkungen folgender Geräte berücksichtigt werden müssen:

- Pflug
- Düngerstreuer/Güllefass
- Pflanzenschutzgeräte
- Sämaschine

2.3.3.7.1 Pflug

Große Bedeutung für Agrivoltaik-Anlagen liegt in der beim Pflügen inhärente Furchenbildung, da es bei dieser zur Bodenverschiebung kommt, welche besonders am Ackerrand durch Furchenbildung an der einen und Bodenanhäufung an der anderen Seite kommt. Durch Spaltung des Feldes durch Photovoltaik-Anlagen wird die Feldrandlänge künstlich erhöht. Aufgrund der Furchenbildung kommt es dadurch zur Einengung der Ackerbreite. Auch kann die Furche zu späteren Problemen bei der Verwendung der nachfolgenden Geräte kommen.

Die Bodenanhäufung an der einen Seite erscheint nur in der ersten Anwendung nach Installation der Anlage als Problem, da es bei darauffolgender Pflügenanwendung in wechselnden Richtungen anstelle einer Anhäufung zur Füllung der zuvor entstandenen Furche kommt.

Um die Furchenbildung beim Pflügen zu kompensieren, erscheinen drei Methoden:

- Ackerbreitenerhöhung

Diplomarbeit

Um die Ackerbreiteneinengung des Pflügens durch Furchenbildung zu kompensieren, ergibt sich die Möglichkeit, die Ackerflächenbreite, und somit Reihenabstand der Anlage, um eine Furchenbreite zu erhöhen.

- Pflugeinstellung zur Endfurchengrößenverminderung

Durch Einstellung des Pfluges, speziell die Höheneinstellung des Mitläuferrades, ist es möglich, die Tiefe der letzten Furche zu verringern und damit das Erscheinen einer Furche zu vermindern. Allerdings kommt es dabei zu einer geringeren Qualität der letzten Pflugfahrt, und somit auch des Pflanzenwachstums.

- Vermeidung des Pflügens durch Verwendung alternativer Verfahren

Ein weiteres Problem des Pflügens erscheint in der Arbeitsbreite. Es werden oft Pflugbreiten eingesetzt, welche nicht den Reihenabstand durch eine gerade Anzahl an Pflugvorgängen decken. Auch kommt es oft zu leichten Verzügen, welche sich über mehrere Pflugvorgänge addieren. Um diesen Problemen entgegenzuwirken, empfiehlt sich die Verwendung eines Pfluges mit hydraulischer Arbeitsbreiteneinstellung. Dabei lässt sich der Rahmen des Pfluges durch Betätigung der Hydraulik manuell schwenken. Dem Fahrer ist es somit möglich, die Arbeitsbreite des Pfluges an den Rand der Ackerfläche anzupassen. [6; S.599]

Erwähnenswert dazu sind neue Technologien, welche es ermöglichen, die Arbeitsbreite des Pflugs mithilfe von GNSS-Daten zu steuern. Somit kann der Ackerrand ohne Mitwirken des Fahrers exakt bearbeitet werden, sofern dieser als GNSS-Datensatz vorliegt.

Ein Beispiel dieser Technologie bildet das System IQblue Connect des Landmaschinenherstellers Lemken. [8] [9]

Diplomarbeit

2.3.3.7.2 Düngerstreuer/Güllefass

Bei der Ausbringung von Düngemittel erscheinen grundsätzlich zwei Probleme:

- Beschmutzung und Beschädigung der PV-Anlage

Um die Beschmutzung der Anlage zu verhindern, ist es empfehlenswert, die Düngemittel bodennahe auszubringen, da dadurch keine Fremdstoffe an die Oberfläche der PV-Anlage gelangen. Besonders die Verwendung von grobkörnigen Mineraldüngern kann bei der PV-Anlage zu Beschädigungen führen, da sie Steinschlag ähnelt. Auch kann es bei trockenen Düngemitteln zu erhöhter Verstaubung kommen.

- Ungleichmäßige Ausbringung durch fehlende Überlappung

Aufgrund der Feldunterbrechung der PV-Anlagen ist es bei der Düngung nicht möglich, unter Vermeidung der Anlagenbeschmutzung eine Überlappung zu erzielen. Das Streubild zählt deswegen zu einem der wichtigsten Auswahlkriterien. Idealerweise verfügt das Ausbringe-gerät über ein gleichmäßiges Streubild mit steil abfallenden Flanken, da dadurch die notwendige Überdeckung minimal ist, und sich die Auswirkungen der fehlenden Überdeckung gering zeigen.

Es kommen deswegen für eine ideale Bewirtschaftung nur folgende Düngerstreuer-Arten infrage:

- Mineraldünger fest: Auslegerstreuer
- Mineraldünger flüssig: Feldspritze
- Organischer Dünger fest: horizontale Walzen
- Organischer Dünger flüssig: Zwangsverteiler

Außerdem haben Düngerstreuer neben Pflanzenschutzgeräten üblicherweise die größten Arbeitsbreiten, und sind somit ausschlaggebend für die Wahl des Reihenabstandes bei einer Agrivoltaik-Anlage.

In der folgenden Tabelle sind einige am Markt verfügbare Auslegerstreuer für Mineraldünger dargestellt.

Maschinentyp	Arbeitsbreite
BREDAL Schnecke	6 m / 12 m
RAUCH Aero GT 60.1	30 m / 32 m / 36 m

Tabelle 2: am Markt verfügbare Auslegerstreuer für feste Mineraldünger [29];[50];[51]

2.3.3.7.3 Pflanzenschutzgeräte

Pflanzenschutzgeräte haben neben Düngerstreuern üblicherweise die größten Arbeitsbreite, und sind somit ausschlaggebend für die Wahl des Reihenabstandes bei einer Agrivoltaik-Anlage.

Ebenfalls können Pflanzenschutzmittel bei starker Abdrift die Anlage verschmutzen. Falls diese mit Haftmitteln gemischt sind, kann es dazu kommen, dass sich die Anlage nicht mehr ausreichend durch Niederschlag reinigen lässt. [59; S.64]

Es ist dadurch ein besonderes Augenmerk auf die Verteilung der Pflanzenschutzmittel zu legen, um Ertragsminderungen zu vermeiden.

Diplomarbeit

In der folgenden Tabelle sind die verfügbaren Arbeitsbreitenbereiche einiger Feldspritzen-Modelle dargestellt.

Maschinentyp	Arbeitsbreite
KUHN OPTIS	2-16 m
KUHN OMNIS	12-15 m
KUHN DELTIS 2	15-24 m
KUHN ALTIS 2	15-28 m
KUHN LEXIS	18-28 m
KUHN METRIS 2	18-38 m
AMAZONE UF 01	12-24 m
AMAZONE UF 02	12-30 m
AMAZONE UG	15-28 m
AMAZONE UX Special	15-36 m

Tabelle 3: am Markt verfügbare Feldspritzen [19]; [20]; [21]; [22]; [23]; [24]; [25]; [26]; [27]; [28]

In der nächsten Tabelle sind einige Alternativen zur Feldspritze aufgelistet.

Maschine	Arbeitsbreite
APV Rollhacke RH	6 m
APV Ackerstriegel AS	6 m; 9 m; 12 m
APV Variostriegel VS	1,7 m; 3,2 m; 6,2 m; 7,6 m; 9,2 m; 12,2 m

Tabelle 4: am Markt verfügbare Pflanzenschutzgeräte [10]; [11]; [12]; [13]; [14]; [15]; [16]; [17]; [18]

Diplomarbeit

2.3.3.7.4 Sämaschinen

Sämaschinen sollen innerhalb der Anlage nur in vollen Arbeitsbreiten eingesetzt werden, um Arbeitszeit effizient zu nutzen und kompliziertes Blockieren von gewissen Reihen zu verhindern.

Auch die Fahrgassenbildung für darauffolgenden Pflanzenschutz gilt es zu beachten. Bei vielen Sämaschinen gibt es Mechanismen, welche automatisch die Fahrgasse während der Aussaat bildet. Diese Mechanismen können in einer Agrivoltaik-Anlage nur verwendet werden, wenn die Ackerbreite so gewählt wurde, dass die Sämaschine eine ungerade Anzahl an Fahrten innerhalb der Anlage unternimmt. Ansonsten müssen für eine mittige Fahrgasse Pflanzenreihen in zwei verschiedenen Fahrten blockiert werden. Bei wechselnder Fahrtrichtung liegt diese Blockierung an der gleichen Reihe der Sämaschine.

In der folgenden Tabelle werden einige Sämaschinen verschiedener Hersteller und dessen verfügbare Arbeitsbreiten dargestellt.

Maschine	Arbeitsbreite
PÖTTINGER VITASEM	2,5 m / 3 m / 4 m
PÖTTINGER VITASEM A	2,5 m / 3 m / 4 m
PÖTTINGER AEROSAM A	3 m / 3,5 m / 4 m
PÖTTINGER AEROSAM F	4 m / 5 m / 6 m
PÖTTINGER AEROSAM VT	5 m
PÖTTINGER TERRASEM V	4 m / 6 m
KUHN PREMIA	2,5 m / 3 m / 4 m
KUHN MEGANT	4,8 m / 5 m / 5,6 m / 6 m
KUHN ESPRO	3 m / 4 m / 6 m / 8 m
KUHN COMBILINER INTEGRA	3 m / 4 m
KUHN COMBILINER SITERA	3 m / 4 m
KUHN VENTA	3 m / 4 m
HORSCH Express KR	3 m / 3,5 m / 4 m
HORSCH Pronto DC	3 m / 4 m / 6 m
HORSCH Sprinter ST	3 m / 4 m / 6 m / 8 m
AMAZONE D9	2,5 m / 3 m / 3,5 m / 4 m / 6 m / 9 m / 12 m
AMAZONE AD	2,5 m / 3 m / 3,5 m / 4 m / 6 m / 9 m / 12 m
AMAZONE Cataya	3 m / 4 m
JOHN DEERE 740A	6 m / 8 m / 9 m
JOHN DEERE 750A	3 m / 4 m / 6 m

Tabelle 5: am Markt verfügbare Sämaschinen [30]; [31]; [32]; [33]; [34]; [35]; [36]; [37]; [38]; [39]; [40]; [41]; [42]; [43]; [44]; [45]; [46]; [47]; [48]; [49]

Auffällig und bedeutend sind die wiederholende Vertretung der Arbeitsbreiten 3 Meter, 4 Meter und 6 Meter.

2.3.3.8 Sicherheitsabstand

Der Sicherheitsabstand des Ackerflächenrandes zur Anlagenmitte ist vor allem von den PV-Anlagendimensionen abhängig. Zur Bemaßung des Sicherheitsabstandes erscheint es als sinnvoll, die äußerste Kante der Paneele zu berücksichtigen. Bei klassischen Anlagen bleibt diese stets gleich, bei nachgeführten Anlagen kann diese zur Bearbeitung näher an die Anlagenmitte gedreht werden.

Bei der Bewirtschaftung der Anlage verlaufen die Fahrspuren meistens parallel zur Reihenrichtung, dadurch kommt es auch zu keinen Kurvenbahnen. Der Sicherheitsabstand kann dadurch eher klein gewählt werden. Bei der Bewirtschaftung des Feldrandes erscheint es als sinnvoll, den Sicherheitsabstand etwas erhöht zu wählen, sofern es zur Kurvenfahrt bei der Bearbeitung kommt.

Die Größe des Abstandes kann individuell ausgewählt werden. Laut einem Artikel des Journal of Scientific & Engineering Research wird bei einer klassischen Anlage ein Sicherheitsabstand von 0,5 Metern des Ackerrandes zur Paneele-Kante gewählt, welcher beidseitig anliegt. [7; S.129]

2.3.3.9 Gefahren

Als Gefahr lassen sich folgende Punkte erkennen:

- Anfahren an der Anlage
- Effizienzminderung durch Staubbildung
- Verschmutzung und Beschädigung durch Düngerausbringung

Das Anfahren an die Anlage ist eine inhärente Gefahr, und kann schwer verhindert werden. Als am einfachsten erscheint es, als Produzent der Anlage besonders Acht zu geben, um Kollisionen zu verhindern.

Die Staubbildung erfolgt bei ziemlich allen landwirtschaftlichen Verfahren. Die Effizienzminderung durch Staubbildung wird in der Regel durch Niederschlag beseitigt. In längeren Trockenperioden kann es dadurch zu Ertragsminderungen kommen. [59; S.64]

Die Verschmutzung und Beschädigung durch Düngerausbringung lassen sich durch die Wahl eines passenden Dünger-Ausbringe-Verfahrens verhindern. Wie oben ersichtlich wird deshalb bodennahe Ausbringung empfohlen.

2.3.4 Wahl der Dimension der ackerbaulich genutzten Fläche

2.3.4.1 Günstige Reihenabstände

Aus den oben ersichtlichen Daten lässt sich erkennen, dass folgende Faktoren ausschlaggebend für die Wahl der Arbeitsbreite der landwirtschaftlichen Fläche in einer Agri-PV-Anlage sind:

- Arbeitsbreite der Sämaschine
- Arbeitsbreite des Düngerstreuers
- Arbeitsbreite der Pflanzenschutzgeräte
- Verwendung eines Pfluges
- Sicherheitsabstand zur Paneel-Kante
- Kleinste Breite der Paneele (bei Tracking-Anlagen können die Paneele gedreht werden, somit sinkt die Breite)

Die Düngerstreuer und Pflanzenschutzgeräte werden gewählt, sodass deren Arbeitsbreite ein Vielfaches der Arbeitsbreite der Sämaschine beträgt.

In der folgenden Tabelle wird die Wahl des Reihenabstands anhand einiger Beispiele dargestellt.

Es wird dabei angenommen, dass die Arbeitsbreite der Pflanzenschutzgeräte ident oder ein Vielfaches kleiner der Düngerstreuer-Arbeitsbreite ist. Deshalb wird sie nicht selbst angeführt.

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3
Sä-Breite	3 m	4 m	3 m
Düngerstreuer- Arbeitsbreite	12 m	12 m	15 m
Pflugverwendung	ja	nein	nein
Sicherheitsabstand zur Paneel-Kante	0,5 m	1 m	1 m
Kleinste Paneel- Breite	1 m	2 m	1 m
Gewählter Reihenabstand der PV-Anlage	14,5 m	15 m	17 m

Tabelle 6: Beispiele der Reihenabstandswahl aus eigenen Überlegungen

In Beispiel 1 ist auffallend, dass die Arbeitsbreite der Sämaschine viermal in die Düngerstreuer-Arbeitsbreite passt. Deswegen ist bei der Fahrgassengestaltung für spätere Maschinen zu beachten, dass die Mitte der Arbeitsbreite zwischen zwei Reihen liegt. Um eine mittige Fahrgasse zu erhalten, ist es also notwendig, die Fahrspuren auf den mittleren zwei Reihen aufzuteilen. Dieses Problem ist in den anderen Beispielen nicht vorhanden, da es durch die Wahl der Sä-Breite und der Düngerstreuer-Breite zu einer mittleren Spur kommt.

Für die Pflugverwendung wird der Reihenabstand um einen halben Meter erhöht gewählt, da dadurch die Furche weniger zum Problem wird.

Der Sicherheitsabstand zur Anlagenmitte wird bei den Beispielen mit einem halben Meter zur Paneel-Kante dimensioniert.

2.3.4.2 Wendeplatz

Am Wendeplatz werden üblicherweise dieselben Geräte wie für die restliche Ackerfläche verwendet. Dadurch entstehen bei der Abstandswahl der Anlage zum Feldrand die gleichen Bedingungen wie bei der Auswahl des Reihenabstandes.

Da bei Agrivoltaik-Anlagen oft ein Zaun zur Abgrenzung der Anlage genutzt wird, muss auch dieser zur Abstandswahl berücksichtigt werden. Es fällt auch zum Zaun ein Sicherheitsabstand an.

Bei Kurvenbahn des Feldrandes ist zu beachten, dass der ideale Abstand der Anlage eventuell zum am nächsten liegenden Feldrandes etwas größer ausfallen muss, da gezogene Geräte sich in der Kurvenbahn speziell verhalten. Dadurch kann der ideale Sicherheitsabstand zum Zaun an manchen Stellen größer ausfallen.

Ebenfalls ist zu beachten, dass sich die Fahrbahn des Gespanns nicht immer parallel zur PV-Anlagenreihe verläuft. Es wird daher nur der Sicherheitsabstand zur äußersten Paneel-Kante berücksichtigt.

Falls die Dimension des Reihenabstandes nicht zur Kehrtwendung am Feldrand reicht, kann der Feldrandabstand durch ähnliche Verfahren wie der Reihenabstand bestimmt werden.

Diplomarbeit

Anbei werden einige Beispiele zur Dimensionierung des Abstandes der Anlage zum Feldrand.

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3
Sä-Breite	3 m	4 m	3 m
Düngerstreuer- Arbeitsbreite	12 m	12 m	15 m
Pflugverwendung	ja	nein	nein
Sicherheitsabstand zur äußersten Paneel - Kante	0,5 m	1 m	1 m
Sicherheitsabstand zum Feldrand/Zaun	0,5 m	1 m	1 m
Gewählter Abstand der Paneel-Kante zum Feldrand/Zaun	14,5 m	16 m	19 m

Tabelle 7: Beispiele der Feldrands-Abstands-Wahl aus eigenen Überlegungen

Im Beispiel 1 wird die Wahl des Abstandes bei Feldrand parallel zur Anlagenrichtung dargestellt. Der Sicherheitsabstand fällt dadurch kleiner als bei den anderen Beispielen aus. Für die Maße des Abstandes der Anlagenmitte zum Feldrand/Zaun muss dabei der Abstand der Paneel-Kante zur Anlagenmitte berücksichtigt werden.

In allen drei Beispielen wird angenommen, dass alle verwendeten Geräte im angegebenen Abstand wenden können.

2.4 Bewirtschaftung mit Grünland

2.4.1 Nutzung als Weidefläche

Die einfachste Methode für die Bewirtschaftung für Grünland mit Agri-PV-Anlagen ist die Weidehaltung von Tieren. Dabei ist eine Wasserquelle notwendig.

Natürlich spielt auch die Größe der gehaltenen Tiere eine wichtige Rolle. Theoretisch kann man auf solchen Flächen jede Art von Nutztieren halten. Jedoch ist zu bedenken, dass größere Nutztiere wie Rinder oder Pferde mühsam an das Futter unter den Modulen gelangen. Dies kann dazu führen, dass nicht die gesamte Weidefläche ausgenutzt wird und dadurch Futterquellen verloren gehen.

Außerdem ist zu beachten, dass Tiere, die leicht an die PV-Modulen gelangen, diese auch beschädigen können.

Aus diesen Gründen werden Ziegen, Schweine oder Hühner bevorzugt auf Weideflächen mit Agri-PV-Anlagen gehalten.



Abbildung 20: Klassische PV-Anlage mit Grünfläche für Weidehaltung (eigene Aufnahme)

2.4.2 Relevante Geräte für die Bewirtschaftung als Mähwiese

Bei klassischen Agri-PV-Anlagen mit Grünland ist es wichtig einen möglichst kleinen Reihenabstand zu haben, damit pro Hektar mehr Agri-PV-Anlagen gebaut werden können und somit mehr Strom erzeugt wird. Im Folgenden werden landwirtschaftliche Arbeitsgänge für Grünland in der Landwirtschaft dargestellt.

2.4.2.1 Mähwerk

Bei Mähwerken spielt vor allem die Frontausführung eine besondere Rolle. Seitenausführungen kommen in diesem Fall nicht in Frage, da diese eine zu hohe Gesamtbreite besitzen. Außerdem sind Mähwerke mit Schwadablage sehr von Vorteil. Durch die Schwadablage kann das Futter direkt nach dem Mähen mit einem Ladewagen aufgenommen und abtransportiert oder mit einer Ballenpresse gepresst werden. Dies hat den Vorteil, dass einige Arbeitsgeräte wie Schwader oder Zettkreisel gegebenenfalls nicht benötigt werden.

2.4.2.2 Schwader

Schwader werden benötigt, um das frisch gemähte oder getrocknete Gras in ein schönes Schwad zu verwandeln, damit es später weiterverarbeitet bzw. abtransportiert werden kann. Bei den meisten Schwadern gibt es jedoch ein signifikantes Problem, sie sind entweder zu breit oder besitzen keine Mittelablage, sondern nur eine Seitenablage. Schwader mit Seitenablage sind bei Agri-PV-Anlagen mit kleinen Abständen nicht zu empfehlen, da diese Schwader den Schwad teilweise unter der Anlage oder zu nahe an einen Ständer ablegen. Dadurch wird der Abtransport bzw. die Weiterverarbeitung erschwert oder gar nicht ermöglicht. Hingegen bei Schwader mit Mittelablage wird die Schwad in der Mitte abgelegt, was den Abtransport erleichtert. Das jedoch größte Problem bei Schwader für diesen Einsatzbereich ist, dass es nicht viele Hersteller gibt, die solche Spezialmaschinen anbieten. Ein Beispiel für solch einen Schwader ist der Kuhn Haybob, welcher eine Arbeitsbreite von 3 Meter mit Mittelablage aufweist. Dieser kann auch falls benötigt als Zettkreisel verwendet werden.



Abbildung 21: Kuhn Haybob [3]

2.4.2.3 Zettkreisel

Die wichtigsten Maschinen für das schnelle Trocknen des Mähgutes ist der Zettkreisel bzw. der Zetter. Da durch den Schattenwurf der Agri-PV-Anlage das gemähte Gras länger zum Trocknen benötigt als sonst, spielt der Zetter eine besonders große Rolle bei der Trocknung des Grases bzw. der Produktion von Heu.

Beim Zetter besteht dasselbe Problem wie bei dem Schwader. Aufgrund der benötigten geringen Arbeitsbreite gibt es nicht viele Hersteller, die solch eine Maschine in den Verkehr bringen. Wie schon beim Schwader kann man für den Zettvorgang den Haybob von Kuhn mit einer Arbeitsbreite von 3 Meter verwenden oder einen beliebigen Zettkreisel mit 2 Kreisel.

Die Verwendung einer Grenzstreueinrichtung ist zwischen den Agri-PV-Anlagen nicht zu empfehlen, da diese das Gras größtenteils unter die PV-Module werfen würde. Außerhalb der Anlage kann eine Grenzstreueinrichtung von Vorteil sein. Durch die Grenzstreueinrichtung kann der Abstand des Gutes zu den PV-Modulen vergrößert werden. Weitere Arbeitsschritte können dadurch erleichtert werden.

2.4.2.4 Ladewagen

Ladewagen werden für den Abtransport des Mähgutes genutzt. Da alle Ladewagen eine geringere Breite haben als Maschinen bei anderen Arbeitsvorgängen und der Abtransport sehr einfach ist, ist dieses Gerät für die Wahl der Abstände der Agri-PV-Anlage zu vernachlässigen.

2.4.2.5 Ballenpresse

Egal ob Rundballen oder Quaderballen, Ballenpressen sind bei der normalen Bewirtschaftung von Grünflächen ein essenzieller Bestandteil. Jedoch ist der Einsatz von Ballenpressen bei Agri-PV-Anlagen schwieriger. Aufgrund des geringen Abstandes zwischen den PV-Modulen können Ballen nur schwer zwischen den Anlagen abtransportiert werden. Für den Transport der Ballen wird in diesem Fall ein Frontlader mit Ballengabel oder Ballenzange benötigt. Um den Abtransport der Ballen möglichst unkompliziert zu gestalten, sollte man die Ballen außerhalb der Agri-PV-Anlagen ablegen, also auf den Wendepplatz. Dies ist bei Rundballenpressen aufgrund der unterschiedlichen Feldlängen problematisch und bei Quaderballenballen kaum machbar. Wie schon der Ladewagen hat die Ballenpresse keine signifikante Auswirkung auf den Abstand zwischen den Agri-PV-Anlagen.

2.4.2.6 Düngerstreuer/Güllefass

Bei der klassischen Agri-PV-Anlage auf Grünland sind Düngerstreuer und Güllefüßer nicht von großer Bedeutung. Die meisten Düngerstreuer und Güllefüßer haben eine Streubreite die größer ist als der Abstand zwischen den Agri-PV-Anlagen. Deshalb sollte man bei der Bewirtschaftung auf diese Geräte verzichten, da der Einsatz zur Verunreinigung und schlimmstenfalls sogar zur Beschädigung der Agri-PV-Anlage führt. Für geringe Arbeitsbreiten geeignete Düngerstreuer sind Kastenstreuer.

2.4.2.7 Mulcher

Ein wichtiges Gerät für die Landschaftspflege ist der Mulcher. Der Mulcher wird zum Mähen und gleichzeitigem Zerkleinern des Mähgutes verwendet. Die gleichzeitige Zerkleinerung und Verteilung fördert die Verrottung des Mähgutes. Dies hat den Vorteil, dass das gemähte Gras nicht abtransportiert werden muss, sondern direkt auf der Fläche bleiben kann.

2.4.2.8 Mähroboter bzw. Mulchroboter

Da es bei der Bewirtschaftung unter der Agri-PV-Anlage aufgrund der niedrigen Höhe und der vielen Ständer sehr schwer ist mit großen Maschinen zu arbeiten, muss diese Fläche oft händisch bewirtschaftet werden. Hierbei können Mäh- bzw. Mulchroboter Abhilfe schaffen.

Um den Arbeitsbereich für den Mähroboter zu bestimmen, werden die zu bearbeitenden Flächen mit einem Begrenzungskabel umrundet. Dafür gibt es zwei Installationsmöglichkeiten:

- Kabel wird mithilfe von Haken am Boden fixiert
- Kabel wird eingegraben (min. 1cm und max. 20cm tief)

[64; S 16]

Unterschiede gibt es auch bei den Arbeitsmethoden des Mähroboters. Eine Methode ist, sobald der Roboter auf ein Hindernis stößt oder sich dem Begrenzungskabel nähert, schlägt dieser eine andere Richtung ein. Dabei erfolgt das Bewegungsmuster des Roboters nach dem Zufallsprinzip, welches zur Folge hat, dass ein Bewegungsmuster nie wiederholt wird. [64; S 4]

Eine andere Methode ist die GNSS-unterstützte Navigation. Dabei erstellt der Roboter, nach ein paar Tagen in Betrieb, selbständig eine Karte des Arbeitsbereiches. Diese Roboter überprüfen mithilfe des integrierten GNSS, welche Bereiche der zu bewirtschaftenden Fläche bereits gemäht wurden und welche noch gemäht werden müssen. [64; S 30, 31]

Je nach der Größe der Agri-PV-Anlage muss die richtige Anzahl an Ladestationen bzw. an Mährobotern gewählt werden. Dabei spielt eine Rolle, ob Mähroboter mit einer eigenen Stromversorgung also mit einem integrierten Solarmodul verwendet werden oder nicht. Obwohl es unter den PV-Modulen meistens schattig ist, können durch Änderung der Arbeitszeiten signifikante Unterschiede bei der Betriebsdauer vorkommen.

2.4.3 Wahl der Dimension der über Grünland genutzten Fläche

2.4.3.1 Günstige Arbeitsbreiten

Die minimale Arbeitsbreite geht von dem breitesten Gerät aus. Falls man einen Schwader verwendet. Allgemein kann man sagen, dass eine Arbeitsbreite von mindestens 2,9 bis 3 Meter vorgesehen werden soll.

Dieser Abstand der PV-Module gilt auch im Falle einer Verwendung einer 3 Meter breiten Maschine. Dies hat den Grund, dass man mit solch einer Maschine auf mindestens einer Seite unter die Agri-PV-Anlage fahren kann. Weil die Ständer nicht direkt am Rand des Modules platziert sind, hat man dadurch genügend Sicherheitsabstand zu den Ständern. Dabei muss der Aushubvorgang beachtet werden, da man durch das Ausheben die Module sehr leicht beschädigen kann.

2.4.3.2 Wendepplatz

Der Wendepplatz ist abhängig von der Zugmaschine und von der angehängten Maschine. Durch die Länge der Zugmaschine, die Länge des angehängten Geräts und den Wendekreis kann man den Wendepplatz für jeden beliebigen Traktor plus Maschine berechnen. Außerdem wird oft ein Zaun zur Abgrenzung der Agri-PV-Anlage genutzt. Dabei muss auch ein Sicherheitsabstand zum Zaun in der Wahl des Wendepplatzes berücksichtigt werden.

Beispiel:

Für dieses Beispiel werden Werte angenommen, die landwirtschaftliche Maschinen heutzutage vorweisen. Als angehängte Maschine wird ein Ladewagen gewählt, da dieser bei der Verwendung den größten Wendepplatz benötigen. Damit man beim Wenden die Agri-PV-Anlage auf gar keinen Fall beschädigt, muss man zuerst mit dem Anhänger außerhalb der Agri-PV-Anlage stehen.

Wendekreisradius: 5,5 Meter

Länge der Zugmaschine: 4,5 Meter

Länge des Ladewagens: 7 Meter

Diplomarbeit

Wendeplatz:

$$\text{Wendeplatz} = \text{Wendekreisradius} + \frac{\text{Zugmaschinelänge}}{2} + \text{Ladewagenlänge}$$

Formel 1: Formel für Wendeplatzberechnung aus eigener Überlegung

Bei diesem Beispiel würde man einen Wendeplatz von ungefähr 15 Meter benötigen.

Allgemein kann man sagen, dass je nach verwendeter Zugmaschine und Arbeitsgerät der tatsächlich benötigte Wendeplatz sehr stark schwanken kann.

Bei Verwendung von Mulchern wäre ein Wendeplatz von nur 7 Meter notwendig, da man das gemähte und zerkleinerte Gut nicht abtransportieren muss und somit die Verwendung eines Ladewagens wegfällt.

Um bei der Verwendung eines Ladewagens die Anlage während des Wendevorganges nicht zu beschädigen, wäre ein Abstand von 15 m der Agri-PV-Anlage zum Feldende von Vorteil.

Zum Abschluss ist noch anzumerken, dass der bestmögliche Platz zum Wenden von jedem Betreiber solch einer Anlage aufgrund der Bewirtschaftungsmethoden zu bestimmen ist.

2.4.3.3 Gefahren

Bei der Bewirtschaftung von Agri-PV-Anlagen treten viele Gefahrenquellen auf, die ein PV-Modul oder die eingesetzte Maschine beschädigen können.

Bei der Nutzung der Grünfläche als Weidefläche kann es durch die gehaltenen Tiere zu Schäden an der Agri-PV-Anlage kommen.

Beim Einsatz von Maschinen kann das Ausheben des Arbeitsgerätes oder Unebenheiten zu Schäden an den Modulen führen.

Außerdem kann es durch rotierende Bauteile zu Steinschlägen kommen. Dieselbe Gefahr geht auch von rotierenden Bauteilen aus, die beschädigt oder falsch montiert wurden. Beispielsweise kann es beim Mähen dazu kommen, dass ein Messer bricht bzw. falsch eingebaut ist und weggeschleudert wird.

Durch unachtsames Fahren kann man wegen der geringen Arbeitsbreite leicht mit der Zugmaschine an der Anlage streifen und dadurch Schäden verursachen. Deshalb ist

Diplomarbeit

ein Mindestabstand der Agri-PV-Anlagen sehr wichtig. Außerdem können solche Schäden durch die Verwendung von Lenksystemen verhindert werden.

Bei Rundballenpressen ist die Ablage der Ballen besonders gefährlich, da es durch das unkontrollierbare Rollen des Ballens schnell zu Schäden kommen kann.

Eine andere Beeinträchtigung auf die Stromproduktion ist die Staubbildung. Besonders an trockenen Tagen kann dies zu einer Beeinflussung der Stromerzeugung führen. Die Reinigung der PV-Module erfolgt in Österreich durch Regen.

3 ÜBERPRÜFUNG DER GNSS-FUNKTIONSFÄHIGKEIT

3.1 Problemstellung

Wie bei der Bewirtschaftung von normalen Acker- und Grünlandflächen ist bei Agri-Photovoltaik-Anlagen effizientes und genaues Arbeiten wichtig. Um dies zu erreichen, sollte möglichst gerade gearbeitet werden und die Arbeitsbreite der Geräte möglichst gut ausgenutzt werden. Heutzutage verwendet man dafür verschiedenste Lenksystem. Bei der Bewirtschaftung auf Agri-Photovoltaik-Anlagen spielt dies eine besonders große Rolle, da man durch unachtsames Führen einer Zugmaschine sehr leicht kostspielige Unfälle bzw. Schäden verursachen kann. Deshalb soll die Genauigkeit bzw. die Funktionsfähigkeit von Lenksystemen bzw. GNSS (Global Navigation Satellite System) beim Einsatz in Agri-Photovoltaik-Anlagen evaluiert werden.

3.2 Material und Methode

Für die Durchführung des Versuchs wird ein RTK Handheld Surveyor Kit der Marke ArduSimple, ein Tablet bzw. ein Smartphone, ein Maßband, ein USB-Kabel (USB-Mini auf USB-Type C), eine kleine magnetische Wasserwaage, ein Korrektursignal, ein Steuergerät für die mitführende Agri-PV-Anlage und ein Farbspray verwendet. Auf dem Tablet oder Smartphone muss die App SW-Maps installiert sein, welche man ganz einfach und kostenlos aus dem App Store herunterladen kann. Die verwendete Wasserwaage besteht aus zwei kleinen Wasserwaagen, die zueinander normal stehen.

Außerdem braucht man zwei Messstäbe. Bei dem ersten Messstab kann man den Empfänger in einer Höhe von 0,8 Meter befestigen. Bei dem zweiten Messstab kann man den Empfänger in einer Höhe von 2 Metern befestigen. Jeder Messstab verfügt über eine Halterung für eine magnetische Wasserwaage.



Abbildung 23: 0,8 Meter Messtab und
2 Meter Messtab mit kleiner
Wasserwaage und Signalempfänger
(eigene Aufnahme)



Abbildung 22: Tablet verbunden mit Signalempfänger (eigene Aufnahme)

3.2.1 Bestimmung der Messpunkte

Für die einzelnen Messungen muss man im Vorhinein einige Messpunkte und die dazugehörige Messhöhe, in diesem Fall 0,8 Meter oder 2 Meter, für jede einzelne Agri-Photovoltaik-Anlage festlegen. Die Messpunkte wurden von der BLT Wieselburg ermittelt. Wie man auf den einzelnen Skizzen erkennen kann, gibt es unterschiedliche Farben bei den Messpunkten, nämlich Rot und Grün (siehe Abbildung 24). Die roten Punkte werden nur einmal gemessen, da diese für die Verwendung einer Zugmaschine mit Lenksystem zweitrangig sind. Die wichtigsten Positionen werden mit einem grünen Punkt markiert und mehrmals getestet. Auffallend ist, dass jeder dieser Punkte bei der Anlage auf Grünlandfläche einen Abstand von 1,45 Metern zum Panel hat und in einer Höhe von 2 Metern platziert ist. Bei beiden Ackerflächen sind diese Punkte in derselben Höhe, aber mit einem Abstand von 1,5 Meter zum Blühstreifen platziert. Der Grund dafür ist, dass im Normalfall bei Traktoren der GNSS-Signalempfänger oben in der Mitte auf der Fahrerkabine befestigt ist und die gängigsten Maschinen für die Bewirtschaftung eine Arbeitsbreite von 3 Metern haben. Jede der unterschiedlichen Messungen der grünen Punkte sollte an verschiedenen Tagen und Uhrzeit durchgeführt werden, damit zum Messzeitpunkt immer leicht unterschiedliche Witterungsverhältnisse vorhanden sind. Andere wichtige Punkte, die nur einmal gemessen werden, sind unter der Agri-PV-Anlage. Diese Punkte sind wichtig, da man unter der Agri-PV-Anlage ein GNSS-Signal für die Verwendung von zum Beispiel Mährobotern benötigen würde.

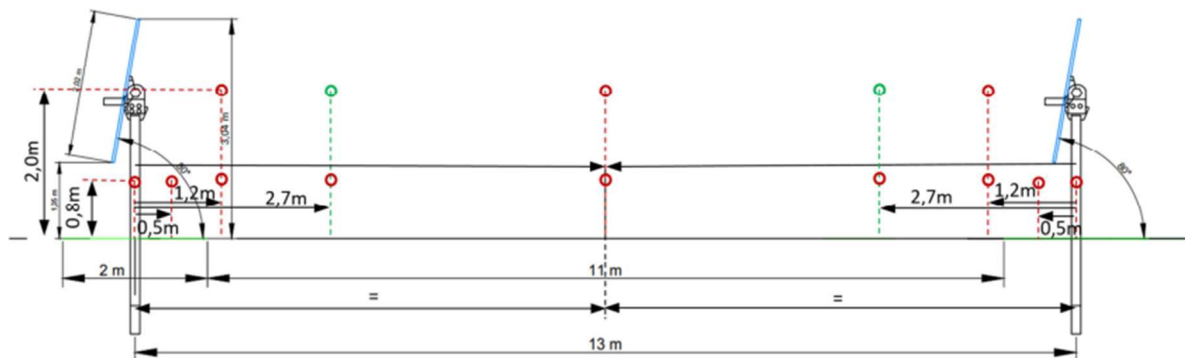


Abbildung 24: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche mit Messpunkten [61]

3.2.2 Zusammenbau des Messgerätes

Dafür wird der GNSS-Signalempfänger auf den gewünschten Messstab befestigt und über ein USB-Kabel mit einem Tablet verbunden. Über das Smartphone wird ein Hotspot erstellt, mit dem man das Tablet verbindet. Anschließend muss man die App SW-Maps öffnen und eine Verbindung mit dem GNSS-Signalempfänger herstellen. Danach muss man sich mit dem „APOS“ Korrektursignal verbinden. Eventuell muss ein wenig gewartet werden, bis der Empfänger ein Signal erkennt. Sobald der Empfänger ein Signal empfängt, kann die Messung durchgeführt werden. Die Messungen finden immer zwischen zwei gegenüberliegenden Ständer statt um die einzelnen Abstände besser messen zu können. Jede der Messungen wird pro Agri-PV-Anlage bei vier verschiedenen Ständerpaaren durchgeführt.

Diplomarbeit

Sobald man die vier Messungen abgeschlossen hat, wird der GNSS-Signalempfänger am 2-Meter-Messstab befestigt. Der Messvorgang ist derselbe wie mit dem 0,8-Meter-Messstab nur das man die einzelnen Messpunkte nicht mehr abmessen muss, da man sie schon im Vorhinein markiert hat. Die Messungen finden bei denselben vier Ständerpaaren statt.

Wenn man alle Punkte gemessen hat, wird die nachgeführte Agri-PV-Anlage in Seitenlage gebracht. Dabei wird die Anlage in Richtung Osten gedreht, bis sie am Anschlag ansteht. In diesem Fall stehen die Paneele der Agri-PV-Anlage circa 80° zum Boden.

Nachdem die Anlage gedreht wurde, beginnt der Messvorgang von vorne. Der Ablauf ist ident zu dem Messvorgang bei horizontaler Lage. Es werden auch dieselben Ständerpaare für den Messvorgang genommen. Daher ist der einzige Unterschied, dass man die Punkte für die Messung mit dem 2 Meterstab nicht mehr markieren muss.

Zum Abschluss werden die einzelnen Daten für die Auswertung auf einem Computer übertragen und gespeichert.

Damit bei den wiederkehrenden Messungen andere Witterungsverhältnisse herrschen wird mindestens ein Tag gewartet, bis diese wiederholt werden. Bei den erneuten Messungen der grünen Messpunkte ist der Messvorgang ident.

3.2.4 Ackerflächen mit klassischer Agri-PV-Anlage

Als erstes werden die Punkte in einer Höhe von 0,8 Meter gemessen. Das Maßband wird verwendet, um die Abstände laut Plan einhalten zu können. Dafür wird dieses bei einem gewählten Ständerpaar angelegt. Gemessen wird von der inneren Seite der Ständer.

Die Messungen werden nach Plan (Abbildung 26) an den bestimmten Positionen durchgeführt. Das Messinstrument sollte bei den Messungen möglichst gerade nach oben zeigen. Deshalb wird eine magnetische Wasserwaage auf den Messstab angebracht. Bei jeder der Messungen wird der Sky Plot und der GNSS-Status durch einen Screenshot festgehalten. Dabei wird die Uhrzeit auf den Screenshots mit der

3.3 Ergebnis

Geplant war eine dreifache Wiederholung der Testung der grünen Punkte. Aufgrund fehlerhafter Ausrüstung und Anlagenwartung war das nicht bei allen Anlagen möglich.

Bei der Grünland-Anlage wurden die Tests wie geplant dreifach durchgeführt.

Bei den Ackerflächen-Anlagen jedoch nicht. Bei der klassischen Agri-PV-Anlage gelang die Testung nur zweimal. Bei der nachgeführten Anlage nur einmal.

Für die Auswertung werden die einzelnen Daten mithilfe von Screenshots festgehalten. Durch sorgfältige Dokumentation und Zeitstempel auf jedem Screenshot kann man diese der jeweiligen Position genau zuordnen.

Für die Auswertung sind folgende Parameter wichtig:

- VDOP (eindimensional)

Der VDOP oder auch Vertical Dilution of Precision beschreibt den Punktfehler in der Vertikalen. [63; S 14]

- HDOP (zweidimensional)

Der HDOP oder auch Horizontal Dilution of Precision beschreibt den Punktfehler in der Horizontalen. [63; S 14]

- PDOP (dreidimensional)

Die Kombination von VDOP und HDOP ergibt den PDOP (Positional Dilution of Precision). Für den Positionsfehler in der GPS-Praxis ist der PDOP wichtig, da er den rein geometrischen Fehlereinfluss der Satellitenstellung auf die Messwerte beschreibt. Mit ansteigendem Satellitenabstandswinkel sinkt der Punktfehler. Mithilfe des PDOP-Wertes kann der Gesamtfehler berechnet werden, indem man die entsprechende Fehlergröße mit dem PDOP-Wert multipliziert. [63; S 14]

Laut [2] entsprechen PDOP-Werte von 1 der idealen Satellitengeometrie für die Positionsbestimmung. Werte unter 3 gelten als gut und Werte zwischen 3 und 8 sind

Diplomarbeit

normal und liefern eine befriedigende Positionsbestimmung. Werte über 8 gelten als schlecht. [2; S 39]

- Anzahl der Satelliten

Für die Positionsbestimmung benötigt man mindestens vier Satelliten. [63; S 11]

- Latitude Error (Breitengradfehler)
- Longitude Error (Längengradfehler)
- Horizontal Accuracy (Horizontale Genauigkeit)
- Vertical Accuracy (Vertikale Genauigkeit)

3.3.1 Ackerflächen mit mitführender Agri-PV-Anlage

- 0°-Stellung (horizontal Stellung)

Die Messung direkt unter der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,22. Dies sagt aus, dass man unter der Agri-PV-Anlage die genaue Position sehr gut bestimmen kann.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,66	0,60	0,85
VDOP	1,03	0,94	1,29
PDOP	1,22	1,13	1,55
Latitude Error [mm]	14	10	30
Longitude Error [mm]	16	10	48
Horizontal Accuracy [mm]	22	14	51
Vertical Accuracy [mm]	36	15	82

Tabelle 8: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der mitführenden Agri-PV-Anlage in horizontal Stellung (siehe Abbildung 25)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 14 mm. Durchschnittlich 16 mm beträgt der Längengradfehler. Ein durchschnittlicher Wert von 22 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 36 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind.

Bei jeder Messung waren mindestens 21 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 im Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen unter einer nachgeführten Agri-PV-Anlage bei 0°-Stellung in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,19. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,63	0,58	0,66
VDOP	1,00	0,89	1,03
PDOP	1,19	1,07	1,22
Latitude Error [mm]	10	10	14
Longitude Error [mm]	10	10	16
Horizontal Accuracy [mm]	14	14	19
Vertical Accuracy [mm]	16	11	30

Tabelle 9: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in horizontal Stellung (siehe Abbildung 25)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 10mm. 10mm beträgt der Längengradfehl durchschnittlich. Einen Mittelwert von 14mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 16mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind.

Bei jeder Messung waren mindestens 21 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 in Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer nachgeführten Agri-PV-Anlage bei 0°-Stellung in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,06. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,63	0,58	1,12
VDOP	0,85	0,78	1,62
PDOP	1,06	0,98	1,97
Latitude Error [mm]	12	10	38
Longitude Error [mm]	12	10	42
Horizontal Accuracy [mm]	16	14	56
Vertical Accuracy [mm]	20	11	75

Tabelle 10: Messergebnis bei 2 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in horizontal Stellung (siehe Abbildung 25)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 12 mm. 12 mm beträgt der Längengradfehl durchschnittlich. Ein Mittelwert von 16 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 20 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 22 Satelliten in Sicht und davon mindestens 18 im Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer nachgeführten Agri-PV-Anlage bei 0°-Stellung in einer Höhe von 2 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

- 80°-Stellung (vertikal Stellung)

Die Messung direkt unter der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,11. Dies sagt aus, dass man unter der PV-Anlage die Position sehr gut bestimmen kann.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,65	0,58	0,83
VDOP	0,90	0,82	1,07
PDOP	1,11	1,02	1,35
Latitude Error [mm]	19	10	59
Longitude Error [mm]	24	10	91
Horizontal Accuracy [mm]	30	14	108
Vertical Accuracy [mm]	42	14	160

Tabelle 11: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der mitführenden Agri-PV-Anlage in vertikal Stellung (siehe Abbildung 25)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 19 mm. Durchschnittlich 24 mm beträgt der Längengradfehl. Ein durchschnittlicher Wert von 30 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 42 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Allerdings muss beachtet werden, dass sechs von acht Messungen sehr nahe bei dem jeweiligen Minimum liegen. Bei jeder Messung waren mindestens 20 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 in Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen unter einer nachgeführten Agri-PV-Anlage bei 80°-Stellung in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,14. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,67	0,57	0,84
VDOP	0,92	0,78	1,19
PDOP	1,14	0,97	1,44
Latitude Error [mm]	11	10	17
Longitude Error [mm]	10	10	13
Horizontal Accuracy [mm]	15	14	19
Vertical Accuracy [mm]	15	10	30

Tabelle 12: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in vertikal Stellung (siehe Abbildung 25)

Der Breitengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 11 mm. 10 mm beträgt der Längengradfehler durchschnittlich. Einen Mittelwert von 15 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 15 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 20 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 in Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich Schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer nachgeführten Agri-PV-Anlage bei 80°-Stellung in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,23. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,73	0,65	0,79
VDOP	0,99	0,83	1,06
PDOP	1,23	1,05	1,30
Latitude Error [mm]	11	10	13
Longitude Error [mm]	11	10	13
Horizontal Accuracy [mm]	15	14	18
Vertical Accuracy [mm]	17	10	25

Tabelle 13: Messergebnis bei 2 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in vertikal Stellung (siehe Abbildung 25)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 11 mm. 11 mm beträgt der Längengradfehler durchschnittlich. Einen Mittelwert von 15 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 17 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 22 Satelliten in Sicht und davon mindestens 18 im Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer nachgeführten Agri-PV-Anlage bei 80°-Stellung in einer Höhe von 2 Meter kein Problem darstellen sollte.

3.3.2 Ackerflächen mit klassischer Agri-PV-Anlage

Die Messung direkt unter der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,39. Dies sagt aus, dass man unter der PV-Anlage die genaue Position sehr gut bestimmen kann.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,81	0,61	0,99
VDOP	1,13	0,84	1,50
PDOP	1,39	1,03	1,80
Latitude Error [mm]	29	12	57
Longitude Error [mm]	28	11	81
Horizontal Accuracy [mm]	40	16	99
Vertical Accuracy [mm]	46	21	76

Tabelle 14: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der klassischen Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 26)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 29 mm. Durchschnittlich 28 mm beträgt der Längengradfehl. Ein Durchschnittlicher Wert von 40 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 46 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 20 Satelliten in Sicht und davon mindestens 16 im Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen unter einer klassischen Agri-PV-Anlage in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,48. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,86	0,66	1,36
VDOP	1,21	0,85	2,04
PDOP	1,48	1,08	2,44
Latitude Error [mm]	30	10	78
Longitude Error [mm]	26	10	57
Horizontal Accuracy [mm]	38	14	90
Vertical Accuracy [mm]	37	11	86

Tabelle 15: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 26)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 30 mm. 26 mm beträgt der Längengradfehler durchschnittlich. Ein Mittelwert von 38 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 37 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 20 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 in Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer klassischen Agri-PV-Anlage in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,31. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,77	0,66	1,48
VDOP	1,06	0,92	1,94
PDOP	1,31	1,16	2,44
Latitude Error [mm]	11	10	15
Longitude Error [mm]	11	10	15
Horizontal Accuracy [mm]	15	14	20
Vertical Accuracy [mm]	17	11	30

Tabelle 16: Messergebnis bei 2 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 26)

Der Breitenengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 11 mm. 11 mm beträgt der Längengradfehler durchschnittlich. Ein Mittelwert von 15 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 17 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 21 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 in Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer klassischen Agri-PV-Anlage in einer Höhe von 2 Meter kein Problem darstellen sollte.

3.3.3 Grünlandfläche mit klassischer Agri-PV-Anlage

Die Messung direkt unter der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,29. Dies sagt aus, dass man unter der Agri-PV-Anlage die genaue Position sehr gut bestimmen kann.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,73	0,65	0,87
VDOP	1,07	0,89	1,23
PDOP	1,29	1,10	1,51
Latitude Error [mm]	30	11	120
Longitude Error [mm]	25	10	95
Horizontal Accuracy [mm]	35	14	153
Vertical Accuracy [mm]	43	21	150

Tabelle 17: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der klassischen Agri-PV-Anlage mit Grünlandfläche (siehe Abbildung 27)

Der Breitengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 30 mm. Durchschnittlich 25 mm beträgt der Längengradfehl. Einen durchschnittlichen Wert von 35 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 43 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 21 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 im Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen unter einer klassischen Agri-PV-Anlage in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,31. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,73	0,65	0,87
VDOP	1,09	1,01	1,23
PDOP	1,31	1,20	1,51
Latitude Error [mm]	21	11	65
Longitude Error [mm]	20	10	47
Horizontal Accuracy [mm]	25	14	80
Vertical Accuracy [mm]	27	12	103

Tabelle 18: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage mit Grünlandfläche (siehe Abbildung 27)

Der Breitengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 21 mm. 20 mm beträgt der Längengradfehler durchschnittlich. Einen Mittelwert von 25 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 27 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 21 Satelliten in Sicht und davon mindestens 17 im Einsatz.

Aufgrund dieser Messungen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer klassischen Agri-PV-Anlage in einer Höhe von 0,8 Meter kein Problem darstellen sollte.

Diplomarbeit

Die Messung neben der Agri-PV-Anlage ergeben einen durchschnittlichen PDOP-Wert von 1,33. Daraus folgt, dass man neben der Agri-PV-Anlage eine sehr gute Positionsgenauigkeit hat.

	Mittelwert	Minimum	Maximum
HDOP	0,76	0,57	1,62
VDOP	1,09	0,79	2,10
PDOP	1,33	0,99	2,65
Latitude Error [mm]	12	10	28
Longitude Error [mm]	11	10	24
Horizontal Accuracy [mm]	15	10	36
Vertical Accuracy [mm]	18	10	42

Tabelle 19: Messergebnis bei 2 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage mit Grünlandfläche (siehe Abbildung 27)

Der Breitengradfehler liegt bei einem Durchschnittswert von 12 mm. 11 mm beträgt der Längengradfehler durchschnittlich. Ein Mittelwert von 15 mm kommt bei der horizontalen Genauigkeit vor. Die durchschnittliche vertikale Genauigkeit beträgt 18 mm. Allgemein kann man sagen, dass die Ergebnisse bei diesen vier Parametern sehr gut sind. Bei jeder Messung waren mindestens 21 Satelliten in Sicht und davon mindestens 18 im Einsatz.

Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von GNSS-Systemen neben einer klassischen Agri-PV-Anlage in einer Höhe von 2 Meter kein Problem darstellen sollte.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Schlussfolgernd lässt sich erkennen, dass die Dimensionierung der Anlage vor allem von den verwendeten Maschinen, beziehungsweise Bewirtschaftungsmethoden, abhängig ist. Allerdings wird durch eine bereits stehende Anlage die Auswahl neuer Geräte eingeschränkt. Dadurch scheint eine vorausschauende Planung als ebenso wichtig. Es scheint demnach sinnvoll, die Dimensionen einer Anlage auf jeden Betrieb neu auszulegen, um sich an die individuell verfügbaren und zukünftig vorgesehen Geräte anzupassen.

Je nach Anlagentyp kann es zu unterschiedlichen Herausforderungen bei der Bewirtschaftung kommen. In dieser Diplomarbeit werden nur klassische PV-Anlagen auf Acker- und Grünlandfläche sowie nachgeführte PV-Anlagen auf Ackerfläche berücksichtigt. Zur Konzepterstellung für andere Anlagentypen, wie zum Beispiel hoch aufgeständerte PV-Anlagen oder vertikale PV-Anlagen, bedarf es eigenen Überlegungen.

Auch die Empfangsfähigkeit von GNSS-Signalen wird durch Feldversuche mithilfe eines Hand-RTK-Sensors nachgewiesen. Allerdings stellt sich die Frage nach der Verlässlichkeit des Gerätes. Auch kann die Verfügbarkeit des Signales je nach Lage der Anlage verschieden sein, demnach erscheinen lageindividuelle Versuche zur Bestimmung der Güte des Signalempfangs als sinnvoll. Um die Genauigkeit der gemessenen Daten zu erhöhen, erscheint die Wiederholung der Versuche mit anderen Sensoren als sinnvoll.

Da es sich bei der Auswertung nur um Momentanaufnahmen handelt, lässt sich die Funktionsweise eines Lenksystems im Einsatz nicht zur vollen Gänze davon ableiten. Auch erscheint das Risiko bei Fehlmeldungen in einer PV-Anlage höher, da es zu Anlagenschäden kommen kann. Es erscheint daher als sinnvoll, Versuche mit Lenksystemen durchzuführen.

Aus den durchgeführten Messungen lässt sich erkennen, dass die gemessenen Werte der Anlage in Pöchlarn durchaus einer hohen Qualität entsprechen. Dadurch lässt sich schlussfolgern, dass die Verwendung eines GNSS-Lenksystems zu einer hohen Wahrscheinlichkeit möglich ist.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] N. L. Entrup und B. . C. Schäfer, Lehrbuch des Pflanzenbaues Band 2: Kulturpflanzen, Clemens-August-Str. 12-14, 53115 Bonn: AgroConcept GmbH, 2011.
- [2] T. Ralf, *Untersuchung von Telematikanwendungen im Radverkehr mit besonderer Berücksichtigung der Navigationsmöglichkeiten mittels GPS-Handgeräten*, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2001.
- [3] „kuhn.de,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/futterernte/wender/universalheumaschine/haybob>. [Zugriff am 26 2 2022].
- [4] „kverneland.de,“ KVERNELAND, [Online]. Available: <https://www.kverneland.de/Duengerstreuer/Zweischeibenstreuer/Kverneland-Exacta-EL>. [Zugriff am 28 2 2022].
- [5] J. Oehmichen und e. al., Pflanzenproduktion - Band 1: Grundlagen, Lindenstr. 44-47, D-1000 Berlin 61; Spitalerstr. 12, D-2000 Hamburg 1: Verlag Paul Parey, 1983.
- [6] Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Fachkunde Land- und Baumaschinentechnik, Düsseldorf Straße 23; 42781 Haan-Gruiten: VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL, 2019.
- [7] D. D. Mavani, P. M. Chauhan und V. Joshi, „Beauty of Agrivoltaic System regarding double utilization of same piece of land for Generation of Electricity & Food Production,“ *International Journal of Scientific & Engineering Research* , pp. 118-148, Juni 2019.
- [8] „lemken.com,“ LEMKEN, [Online]. Available: <https://iqblue.lemken.com/iqblue-connect/https://iqblue.lemken.com/iqblue-connect/>. [Zugriff am 15 März 2022].

Diplomarbeit

- [9] „innovationfarm.at,“ INNOVATIONFARM, [Online]. Available: <https://www.innovationfarm.at/projekte/iqblue-connect-flaechenangepasstes-pfluegen/>. [Zugriff am 15 März 2022].
- [10] „apv.at Rollhacke RH 600,“ APV, [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/rollhacke/rh-600-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [11] „apv.at Ackerstriegel AS 600,“ APV, [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/ackerstriegel/as-600-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [12] „apv.at Ackerstriegel AS 900,“ APV, [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/ackerstriegel/as-900-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [13] „apv.at Ackerstriegel AS 1200,“ APV, [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/ackerstriegel/as-1200-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [14] „apv.at Variostriegel VS 150/300,“ APV, [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/variostriegel/vs-150-m1-vs-300-m1-neu/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [15] „apv.at Variostriegel VS 600,“ [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/variostriegel/vs-600-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [16] „apv.at Variostriegel VS 750,“ [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/variostriegel/vs-750-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [17] „apv.at Variostriegel VS 900,“ APV, [Online]. Available: <https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/variostriegel/vs-900-m1/>. [Zugriff am 14 März 2022].

Diplomarbeit

- [18] „apv.at Variostriegel VA 1200,“ APV, [Online]. Available:
<https://www.apv.at/produkte/kulturpflege/variostriegel/vs-1200-m1/>. [Zugriff
am 14 März 2022].
- [19] „kuhn.de Optis,“ KUHN, [Online]. Available:
<https://www.kuhn.de/ackerbau/feldspritzen/anbaufeldspritzen/optis>. [Zugriff
am 14 März 2022].
- [20] „kuhn.de Omnis,“ KUHN, [Online]. Available:
<https://www.kuhn.de/ackerbau/feldspritzen/anbaufeldspritzen/omnis>. [Zugriff
am 14 März 2022].
- [21] „kuhn.at Deltis2,“ KUHN, [Online]. Available:
<https://www.kuhncenter.at/produkt/deltis-2/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [22] „kuhn.de Altis2,“ KUHN, [Online]. Available:
<https://www.kuhn.de/ackerbau/feldspritzen/anbaufeldspritzen/altis-2>. [Zugriff
am 14 März 2022].
- [23] „kuhn.de Lexis,“ KUHN, [Online]. Available:
<https://www.kuhn.de/ackerbau/feldspritzen/gezogene-feldspritzen/lexis>.
[Zugriff am 14 März 2022].
- [24] „kuhn.de Metris2,“ KUHN, [Online]. Available:
<https://www.kuhn.de/ackerbau/feldspritzen/gezogene-feldspritzen/metris-2>.
[Zugriff am 14 März 2022].
- [25] „amazone.net UF 01,“ AMAZONE, [Online]. Available:
[https://amazone.net/de/produkte-digitale-
loesungen/landtechnik/pflanzenschutztechnik/anbaufeldspritzen/anbaufeldspr
itze-uf-01-2708](https://amazone.net/de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/pflanzenschutztechnik/anbaufeldspritzen/anbaufeldspritze-uf-01-2708). [Zugriff am 14 März 2022].
- [26] „amazone.net UF 02,“ AMAZONE, [Online]. Available:
<https://amazone.net/de/produkte-digitale->

Diplomarbeit

loesungen/landtechnik/pflanzenschutztechnik/anbaufeldspritzen/anbaufeldspritze-uf-02-2714. [Zugriff am 14 März 2022].

[27] „amazone.net UG,“ AMAZONE, [Online]. Available: <https://amazone.net/de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/pflanzenschutztechnik/anhaengefeldspritzen/anhaengefeldspritze-ug-2754>. [Zugriff am 14 März 2022].

[28] „amazone.net UX Special,“ AMAZONE, [Online]. Available: <https://amazone.net/de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/pflanzenschutztechnik/anhaengefeldspritzen/anhaengefeldspritze-ux-special-2742>. [Zugriff am 14 März 2022].

[29] „rauch.de Aero GT 60.1,“ RAUCH, [Online]. Available: <https://rauch.de/duengerstreuer/aero-gt-60-1.html>. [Zugriff am 14 März 2022].

[30] „poettinger.at Vitasem,“ PÖTTINGER, [Online]. Available: https://www.poettinger.at/de_at/produkte/detail/vsem/vitasem-mechanische-anbau-saemaschinen. [Zugriff am 14 März 2022].

[31] „poettinger.at Vitasem A,“ PÖTTINGER, [Online]. Available: https://www.poettinger.at/de_at/produkte/detail/vsema/vitasem-a-mechanische-aufbau-saemaschinen. [Zugriff am 14 März 2022].

[32] „poettinger.at Aerosamm A,“ PÖTTINGER, [Online]. Available: https://www.poettinger.at/de_at/produkte/detail/asema/aerosem-a-pneumatische-aufbau-saemaschinen. [Zugriff am 14 März 2022].

[33] „poettinger.at Aerosam F,“ PÖTTINGER, [Online]. Available: PÖTTINGER
AEROSAM F:
https://www.poettinger.at/de_at/produkte/detail/asemf/aerosem-f-pneumatische-fronttank-saemaschinen. [Zugriff am 14 März 2022].

Diplomarbeit

- [34] „poettinger.at Aerosam VT,“ PÖTTINGER, [Online]. Available: https://www.poettinger.at/de_at/produkte/detail/asemvt/aerosem-vt-pneumatische-gezogene-saekombinationen. [Zugriff am 14 März 2022].
- [35] „poettinger.at Terrasem V,“ PÖTTINGER, [Online]. Available: https://www.poettinger.at/de_at/produkte/detail/tsecf2/terrasem-fertilizer-classic-mulchsaatmaschinen-mit-unterfussduengung. [Zugriff am 14 März 2022].
- [36] „kuhn.de Premia,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/ackerbau/saemaschinen/anbaudrillmaschinen/mechanische-anbaudrillmaschine/premia>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [37] „kuhn.de Megant,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/ackerbau/saemaschinen/anbaudrillmaschinen/pneumatische-anbaudrillmaschinen/megant>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [38] „kuhn.de Espro,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/ackerbau/saemaschinen/gezogene-drillmaschinen/espro>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [39] „kuhn.de Combiliner Integra,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/ackerbau/saemaschinen/aufbaudrillmaschinen/mechanische-aufbaudrillmaschinen/combiliner-integra>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [40] „kuhn.de Combiliner Sitera,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/ackerbau/saemaschinen/aufbaudrillmaschinen/mechanische-aufbaudrillmaschinen/combiliner-sitera>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [41] „kuhn.de Venta,“ KUHN, [Online]. Available: <https://www.kuhn.de/ackerbau/saemaschinen/aufbaudrillmaschinen/pneumatische-aufbaudrillmaschinen/venta>. [Zugriff am 14 März 2022].

Diplomarbeit

- [42] „horsch.com Express KR,“ HORSCH, [Online]. Available: <https://www.horsch.com/produkte/saemaschinen/3-punkt-saemaschinen/express-kr>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [43] „horsch.com Pronto DC,“ HORSCH, [Online]. Available: <https://www.horsch.com/produkte/saemaschinen/scheibensaemaschinen/pronto-dc>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [44] „horsch.com Sprinter ST,“ HORSCH, [Online]. Available: <https://www.horsch.com/produkte/saemaschinen/zinkensaemaschinen/sprinter-st>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [45] „amazone.net D9,“ AMAZONE, [Online]. Available: <https://amazone.net/de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/saetechnik/mechanische-saemaschinen/anbau-saemaschine-d9-9680>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [46] „amazone.net AD,“ AMAZONE, [Online]. Available: <https://amazone.net/de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/saetechnik/mechanische-saemaschinen/aufbau-saemaschine-ad-9684>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [47] „amazone.net Cataya,“ AMAZONE, [Online]. Available: <https://amazone.net/de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/saetechnik/mechanische-saemaschinen/mechanische-aufbausaeemaschine-cataya-2794>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [48] „deere.ch 740A,“ JOHN DEERE, [Online]. Available: <https://www.deere.ch/de/saetechnik/740a/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [49] „deere.ch 750A,“ JOHN DEERE, [Online]. Available: <https://www.deere.ch/de/saetechnik/750a/>. [Zugriff am 14 März 2022].

- [50] „bredal.com Schnecke 6,“ BREDAL, [Online]. Available: <https://www.bredal.com/de/produkte/streuschnecken-zum-ausbringen-von-pulverisiertem-kalk/6-meter-schnecke/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [51] „bredal.com Schnecke 12,“ BREDAL, [Online]. Available: <https://www.bredal.com/de/produkte/streuschnecken-zum-ausbringen-von-pulverisiertem-kalk/12-meter-schnecke/>. [Zugriff am 14 März 2022].
- [52] „bergmann-goldenstedt.de Dungstreuer,“ BERGMANN, [Online]. Available: <https://www.bergmann-goldenstedt.de/produkte/produktprogramm/dungstreuer/>. [Zugriff am 19 März 2022].
- [53] „agrospar.de,“ AGROSPAR, [Online]. Available: <https://www.agrospar.de/produkt/miststreuer-35-to-verzinkt-walzen-vertikal-oder-horizontal/>. [Zugriff am 19 März 2022].
- [54] „farmtech.eu SUPERCIS 800/1000,“ FARMTECH, [Online]. Available: <https://www.farmtech.eu/de/produkte/pdetails/supercis-800-1000.html#/>. [Zugriff am 19 März 2022].
- [55] „zunhammer.de K Serie,“ ZUNHAMMER, [Online]. Available: <https://www.zunhammer.de/de/produkte/pumptankwagen/tandem/k-serie>. [Zugriff am 19 März 2022].
- [56] A. Kaeser, D. Dux, F. Herzog und F. Sereke, „Moderne Agroforstwirtschaft in der Schweiz,“ Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen, 2010.
- [57] A. Chalmin, K. Mastel, A. Möndel, M. Oelke und S. Weissenburger, „Teilprojekt Agrar: Aspekte der landwirtschaftlichen Produktion von Agroforstsystemen,“ in *Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung Schlussbericht des Projektes agroforst*, Kutschenweg 20; 76287 Rheinstetten, Landwirtschaftlichs Technologiezentrum Augustenberg, 2008.

- [58] B. Bender, A. Chalmin, T. Reeg, W. Konold, K. Mastel und H. Spiecker, „Moderne Agroforstsysteme mit Werthölzern; Leitfaden für die Praxis,“ Institut für Waldwachstum; Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg; Institut für Landespflege, Tennenbacher Straße 4 · 79106 Freiburg, 2009.
- [59] J. Scharf, M. Grieb und M. Fritz, „Agri-Photovoltaik Stand und offene Fragen,“ Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Schulgasse 18, 94315 Straubing , 2021.
- [60] „DIN SPEC 91434: Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung,“ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 2021.
- [61] *Anlagenpläne*, Raiffeisenstraße 1, 2100 Korneuburg: RWA Solar Solutions GmbH, 2021.
- [62] P. E. Campana, B. Stridh, S. Amaducci und M. Colauzzi, „Optimization of vertically mounted agrivoltaic systems,“ *Journal of Cleaner Production*, 2021.
- [63] M. Bauder, „GPS-Erfassung und GIS-Analyse individueller Personenmobilität,“ Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau Fakultät für Frost- und Umweltwissenschaften Institut für Kulturgeographie, Freiburg, 2011.
- [64] L. Roos, *HUSQVARNA AUTOMOWER 520/550*, SE-561 82 Huskvarna: Husqvarna AB, 2018.
- [65] C. Gerhards, L. Schubert, C. Lenz, F. Wittmann, D. Richter und B. Volz, *Agri-PV - Kombination von Landwirtschaft und Photovoltaik*, Pillnitzer Straße 3, 01326 Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Freistaat Sachsen, 2022.

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Anlagenplan [61].....	15
Abbildung 2: Klassische Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche (eigene Aufnahme).....	16
Abbildung 3: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche (eigene Aufnahme).....	16
Abbildung 4: Klassische PV-Anlage mit Grünfläche (eigene Aufnahme).....	17
Abbildung 5:hochaufgeständerte Agri-PV-Anlage mit Dauerkulturen (eigene Aufnahme).....	17
Abbildung 6: Blühfläche (eigene Aufnahme)	18
Abbildung 7: Schematische Darstellung einer vertikal aufgestellten Anlage mit Darstellung der Beschattungsfläche. [62; S.19].....	20
Abbildung 8: Darstellung einer hoch aufgeständerten Agrivoltaik Anlage [7; S.128].	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Agroforestry-Anlage, wobei hier der Reihenabstand als an die Arbeitsbreite des größten Geräts angepasst dargestellt ist. [58; S.17].....	22
Abbildung 10: Wurfverteiler der Firma Kverneland [4].....	25
Abbildung 11: Querverteilung eines Wurfstreuers von Kverneland [4]	25
Abbildung 12: Auslegerstreuer der Firma BREDAL [50].....	26
Abbildung 13: Feldspritze der Firma AMAZONE [25]	27
Abbildung 14: Dungstreuer mit vertikalen Walzen der Firma BERGMANN	28
Abbildung 15: Dungstreuer mit horizontalen Walzen.....	29
Abbildung 16: Güllestreuer mit schleudernder Ausbringung der Firma ZUNHAMMER	30
Abbildung 17: Güllefass mit Schleppschlauchverteiler der Firma FARMTECH	31
Abbildung 18: Feldspritze der Firma AMAZONE [26]	32
Abbildung 19: Ackerstriegel der Firma APV [13]	33
Abbildung 20: Klassische PV-Anlage mit Grünfläche für Weidehaltung (eigene Aufnahme).....	48

Diplomarbeit

Abbildung 21: Kuhn Haybob [3].....	50
Abbildung 22: Tablet verbunden mit Signalempfänger (eigene Aufnahme)	57
Abbildung 23: 0,8 Meter Messstab und 2 Meter Messstab mit kleiner Wasserwaage und Signalempfänger (eigene Aufnahme).....	57
Abbildung 24: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche mit Messpunkten [61]	58
Abbildung 25: Nachgeführte Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche mit nummerierten Messpunkten [61].....	60
Abbildung 26: Klassische Agri-PV-Anlage mit Ackerfläche mit nummerierten Messpunkten [61].....	62
Abbildung 27: Klassische PV-Anlage mit Grünlandfläche mit nummerierten Messpunkten [61].....	63

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einteilung laut DIN SPEC 91434:2021-05 [65];[60]	13
Tabelle 2: am Markt verfügbare Auslegerstreuer für feste Mineraldünger [29];[50];[51]	38
Tabelle 3: am Markt verfügbare Feldspritzen [19]; [20]; [21]; [22]; [23]; [24]; [25]; [26]; [27]; [28]	39
Tabelle 4: am Markt verfügbare Pflanzenschutzgeräte [10]; [11]; [12]; [13]; [14]; [15]; [16]; [17]; [18]	39
Tabelle 5: am Markt verfügbare Sämaschinen [30]; [31]; [32]; [33]; [34]; [35]; [36]; [37]; [38]; [39]; [40]; [41]; [42]; [43]; [44]; [45]; [46]; [47]; [48]; [49].....	41
Tabelle 6: Beispiele der Reihenabstandswahl aus eigenen Überlegungen	45
Tabelle 7: Beispiele der Feldrands-Abstands-Wahl aus eigenen Überlegungen.....	47
Tabelle 8: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der mitführenden Agri-PV-Anlage in horizontal Stellung (siehe Abbildung 25).....	66
Tabelle 9: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in horizontal Stellung (siehe Abbildung 25).....	67
Tabelle 10: Messergebnis bei 2 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in horizontal Stellung (siehe Abbildung 25).....	68
Tabelle 11: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der mitführenden Agri-PV-Anlage in vertikal Stellung (siehe Abbildung 25)	69
Tabelle 12: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in vertikal Stellung (siehe Abbildung 25)	70
Tabelle 13: Messergebnis bei 2 Meter neben der mitführenden Agri-PV-Anlage in vertikal Stellung (siehe Abbildung 25)	71
Tabelle 14: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der klassischen Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 26)	72
Tabelle 15: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 26)	73

Diplomarbeit

Tabelle 16: Messergebnis bei 2 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage (siehe Abbildung 26)	74
Tabelle 17: Messergebnis bei 0,8 Meter unterhalb der klassischen Agri-PV-Anlage mit Grünlandfläche (siehe Abbildung 27)	75
Tabelle 18: Messergebnis bei 0,8 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage mit Grünlandfläche (siehe Abbildung 27)	76
Tabelle 19: Messergebnis bei 2 Meter neben der klassischen Agri-PV-Anlage mit Grünlandfläche (siehe Abbildung 27)	77

8 FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Formel für Wendepplatzberechnung aus eigener Überlegung54

Diplomarbeit

9 ANHANG

GNSS-Dokumentation