



## ABSCHLUSSBERICHT

### **AgriPV-Bot**

## Synergetische Kombination von Photovoltaik und Agrarrobotik im Gemüsebau

DBU-AZ 38214/01

Laufzeit:

Projektbeginn: 01.09.2022

Projektende: 29.02.2024

Josef Franko

AI.Land GmbH

Siebenhäuser 7

D-47906 Kempen

Tel.: +49 176 81195048

E-Mail: franko@a-i.land

Kempen, 21.05.2024



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	3
1. Zusammenfassung .....	4
2. Motivation .....	4
3. Projektablauf .....	5
4. Projektergebnisse .....	18
5. Öffentlichkeitsarbeit .....	19
6. Fazit/Ausblick .....	22



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept des AgriPV-Bots .....	4
Abbildung 2: FEM Simulation der Haupttraverse .....	5
Abbildung 3: Konstruktion Pivotsäule in CAD .....	5
Abbildung 4: CAD Gesamtmodell .....	6
Abbildung 5: Elektrokonzept Schlitten .....	7
Abbildung 6: Steuerungskonzept des Gesamtsystems .....	7
Abbildung 7: Modulübersicht in Odoo zur Einzelfpflanzenkultivierung .....	8
Abbildung 8: Ackerschlagkartei (Übersicht und Einzelfeldansicht) .....	8
Abbildung 9: Pflanzendatenbank und Maskierung .....	9
Abbildung 10: Fahrplanung für Bonitur .....	9
Abbildung 11: State Machine - Gesamtsystem .....	10
Abbildung 12: State Mashine - Ernte .....	10
Abbildung 13: Erste Greifprozesse in der Simulation .....	11
Abbildung 14: Erweiterung der Simulationsumgebung.....	11
Abbildung 15: Digitaler Zwilling des Prototypens .....	12
Abbildung 16: Erstimplementierung in Halle .....	12
Abbildung 17: Testfeld im Frühjahr 2023 .....	13
Abbildung 18: Schaltschrank an Pivotsäule .....	13
Abbildung 19: Zweiter Schlitten und Testfeld im Jahresverlauf 2023 .....	14
Abbildung 20: Teststand für Laborversuche .....	14
Abbildung 21: Testfeld 2024 .....	15
Abbildung 22: Erste Sensortests auf dem Feld .....	16
Abbildung 23: Kohlrabierkennung auf dem Testfeld .....	16
Abbildung 24: Kohlrabiernte auf dem Testfeld .....	17
Abbildung 25: Bodenvorbereitung und Pflanzung auf dem Testfeld.....	17
Abbildung 26: Robotiktests am Indoor-Teststand .....	18
Abbildung 27: AgriPV-Bot auf Testfeld .....	18
Abbildung 28: AgriPV-Bot Flyer Vorderseite .....	20
Abbildung 29: AgriPV-Bot Flyer Rückseite.....	20
Abbildung 30: AgriPV-Bot Roll-Up .....	21
Abbildung 31: Legomodell .....	22
Abbildung 32: Prototypen der AI.Land GmbH.....	23

## 1. Zusammenfassung

Der AgriPV-Bot beruht auf dem Konzept, energieautark und vollautomatisch verschiedene Gemüsekulturen auf der gleichen Feldfläche zu kultivieren und daraus gemischte Gemüseboxen direkt auf dem Feld kundenspezifisch zu konfektionieren. Dabei bewirtschaftet die semi-mobile Plattform eine kreisförmige Feldfläche von der Bodenbearbeitung bis zu Ernte.

In diesem Projekt sollte der erste Versuchsaufbau des AgriPV-Bots umgesetzt werden, mit dem Ziel das Gesamtkonzept zu validieren, weiterzuentwickeln und dabei im speziellen die synergetische Kombination von Photovoltaik und Agrarrobotik im Gemüsebau zu untersuchen. Entsprechend wurde das System in den Bereichen Hard- und Softwareentwicklungen mit dem Ziel der Funktionsvalidierung ausgelegt und anschließend beschafft, in Betrieb genommen, getestet und bei Bedarf hinsichtlich des Projektziels weiterentwickelt.

Am Ende wird die Frage beantwortet, ob diese disruptive Innovation im Gemüsebau eine Erfolgsaussicht im umkämpften Markt der Landwirtschaft hat und dementsprechend eine auf diesem Projekt aufbauende Produktentwicklung angestrebt wird.

## 2. Motivation

In diesem Projekt sollte das Konzept des AgriPV-Bots (s. Abbildung 1), ein innovatives Kreisbewirtschaftungssystem im Gemüsebau, anhand von Praxisversuchen als Modellvorhaben umgesetzt und untersucht werden.

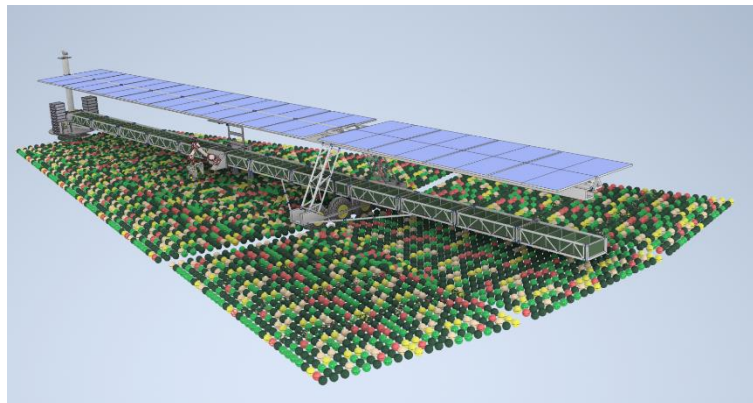


Abbildung 1: Konzept des AgriPV-Bots

Allgemein soll der AgriPV-Bot auf einer Spot-Farming-Fläche täglich frische, gemischte Gemüseboxen autonom und energieautark bestücken und dabei alle pflanzenbaulichen Prozesse von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte präzise und individuell durchführen. Dadurch wird im Vergleich zum konventionellen Gemüsebau ökologisch als auch ökonomisch ein enormer Mehrwert erzielt und soll helfen den aktuellen Herausforderungen im Gemüsebau entgegenzutreten.

Dieses Projekt im speziellen zielt auf die systematische Gewinnung von Erkenntnissen zur synergetischen Kombination von Agrarrobotik mit Photovoltaiksystemen auf Agrarflächen ab. Im Fokus steht die Effizienzsteigerung in der Flächennutzung durch die zusätzliche Energieproduktion. Gleichzeitig soll die Verschattung von Pflanzen durch eine 360 Grad-Rotation des PV-Systems minimiert werden, in Abgrenzung zu den statischen AgriPV-Anlagen. Um Netzanschlusskosten zu vermeiden, soll die Energie lokal zwischengespeichert und von einem integrierten Agrarroboter verbraucht werden. Dazu wird untersucht, ob das Ständerwerk der PV-Anlage eine synergetische Doppelfunktion erfüllen kann und als wetterunabhängige Linearführung für die Agrarrobotik sowie die Feldlogistik adaptierbar ist.

### 3. Projektlauf

Der Projektlauf lässt sich grob in die Bereiche *Hardwareentwicklung*, *Softwareentwicklung*, *Realisierung des Versuchsaufbaus* und *Laborversuche und Feldtests* unterteilen. In der Realität überschneiden sich diese Bereiche an vielen Stellen, sollen aber hier für eine möglichst strukturierte Dokumentation herangezogen werden. Während der Projektlaufzeit wurde das Konzept für den AgriPV-Bot fortlaufend weiterentwickelt, was sich an mehreren Stellen in der Umsetzung auswirkte.

#### Hardwareentwicklung

Um aus dem Konzept in Abbildung 1 eine Testanlage zu realisieren, ist der erste Schritt die mechanische Auslegung. Ziel ist, den ersten AgriPV-Bot mit einer Traversenlänge von 8m aufzubauen. Aus Gründen der späteren Erweiterbarkeit wurden konstruktiv immer 2m Segmente vorgesehen. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Steifigkeitsanalyse anhand der Finite Element Methode für die Haupttraverse, jedoch auf Basis von 24m Länge, um die Auslegung bis zur vollen Größe der Testanlage weitestgehend beibehalten zu können. Hauptfokus dabei war, dass die Traverse steif genug ist, um als Führungsschiene für die Robotik zu dienen, aber gleichzeitig in Kombination mit den PV-Anlage leicht genug bleibt, um ohne Komplikationen übers Feld bewegt werden zu können, in Abgrenzung zur üblichen AgriPV.

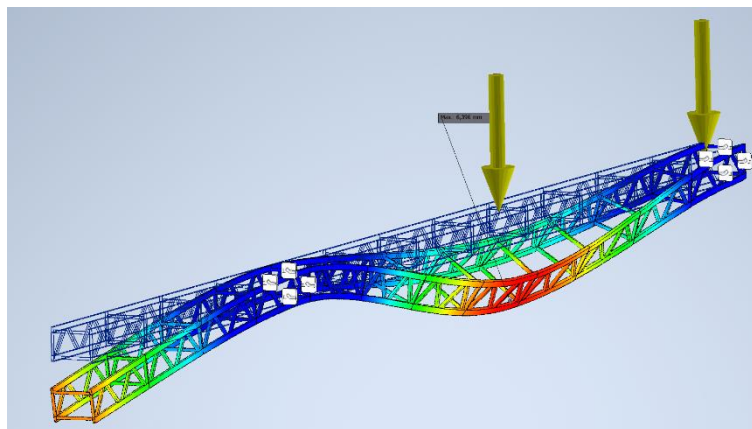


Abbildung 2: FEM Simulation der Haupttraverse

Bei der Konstruktion der strukturellen Komponenten wie Traverse und Pivotsäule (s. Abbildung 3) deren Funktions- und Gestaltungsanforderungen weitestgehend bekannt sind, wurde auf eigene Schweißkonstruktionen gesetzt. Bei den verbleibenden Komponenten wurde für die erste Testanlage auf bewährte Profilsysteme und Bühnenbautechnik zurückgegriffen.

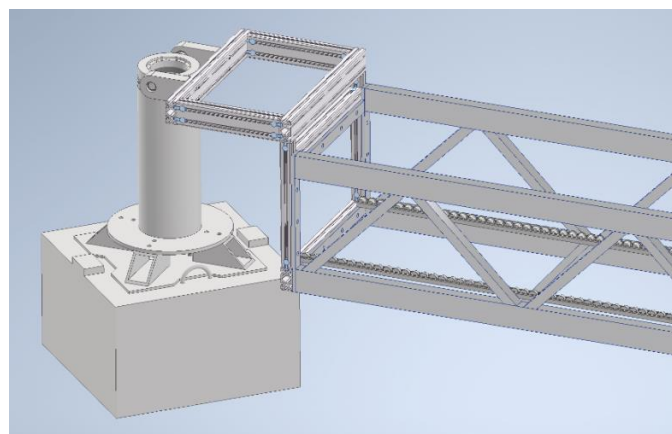


Abbildung 3: Konstruktion Pivotsäule in CAD

Abbildung 4 zeigt dazu das komplette CAD-Modell des mechanischen Aufbaus. Die Bühnenbaukomponenten bilden die obere Traverse für die Aufnahme der PV-Paneele und die Fahrwerksstruktur. Aus Profilsystemen bestand zu Beginn die Hälfte der Haupttraverse, das Verbindungselement zwischen Pivot und beiden Traversen und der Schlitten. Auf dem Schlitten wird die Implementierung des Gemüseerntemodul GEM (Entwicklung gefördert durch REACT-EU) vorgesehen. Das gewählte Profilsystem ermöglicht in der Frühphase der Entwicklung ein hohes Maß an Flexibilität für kurzfristige Modifikationen, beispielsweise die Implementierung des Werkzeugwechselsystems für den Roboter auf dem Schlitten. Als Antriebskomponenten für das Hauptfahrwerk wurde auf Standardlösungen aus der Beregnungsbranche zurückgegriffen. Der Antrieb des Schlittens erfolgt über Rollen mit integriertem Motor.

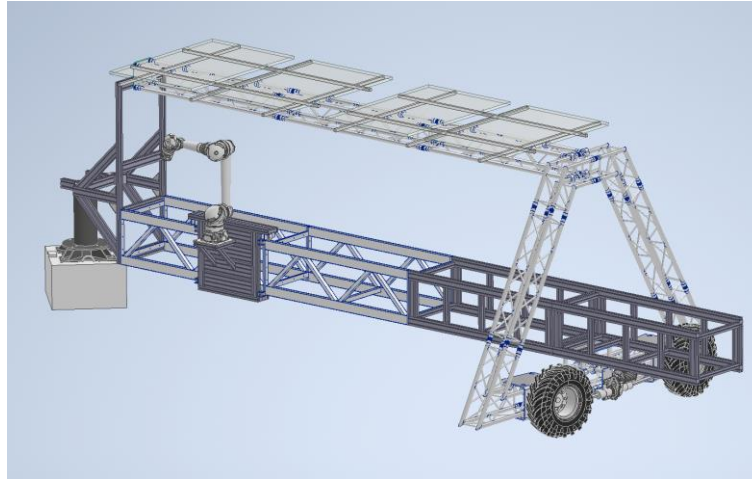


Abbildung 4: CAD Gesamtmodell

Dieser anfängliche Aufbau wurde im Projektverlauf dahingehend modifiziert, dass die beiden Traversensegmente aus Profilsystemen durch eine neue Version von Schweißkonstruktionen ersetzt wurde. Die Komponenten des Profilsystems wiederum wurden für den Aufbau eines Prüfstands für die Wintermonate verwendet. Außerdem wurde ein zweiter Schlitten als Biegeblechkonstruktion aufgebaut, der die Bodenbearbeitung, Bewässerung und das Pflanzen von Setzlingen übernehmen soll.

Auf elektronischer Seite sind alle Energiekonzepte des AgriPV-Bots darauf ausgelegt, dass sie ihren Bedarf aus dem systemeigenen Batteriespeicher decken können, um in Kombination mit der PV-Anlage einen energieautarken Betrieb zu ermöglichen. Für jedes Teilsystem sind Konzepte für die Komponentenauswahl und Verknüpfung erstellt worden, wie beispielhaft für den Schlitten in Abbildung 5 gezeigt. Der Schlitten selbst wird als autarkes Subsystem vorgesehen, sodass zukünftig an der Haupttraverse Ladepunkte für Energie und eventuelle Medien wie Wasser und Dünger installiert werden, die im Laufe der weiteren Entwicklung ausgestaltet werden.

Über die Summe dieser Energiekonzepte lassen sich auch Tendenzen für den Gesamtenergiebedarf der Anlage bestimmen. Jedoch sind diese Abschätzungen mit einem großen Fehler belastet, da sich viele Komponenten zwischen Prototypen- und Serienentwicklung unterscheiden können. Die realen Anforderungen der vorhandenen Komponenten wurden in der Testphase ermittelt. Für das aufgebaute erste Testsystem des AgriPV-Bots speisen vier PV-Paneele mit je 410W Peakleistung eine Batterie im Bereich der Pivotsäule, die für die Versorgung der ersten Tests ausreichend Kapazität bereitstellt (2,4kWh). Eine Erweiterung auf eine höhere Anzahl an Paneelen und Batteriespeicher ist bereits angestoßen, um die Tests in der bevorstehenden Saison ausweiten zu können.

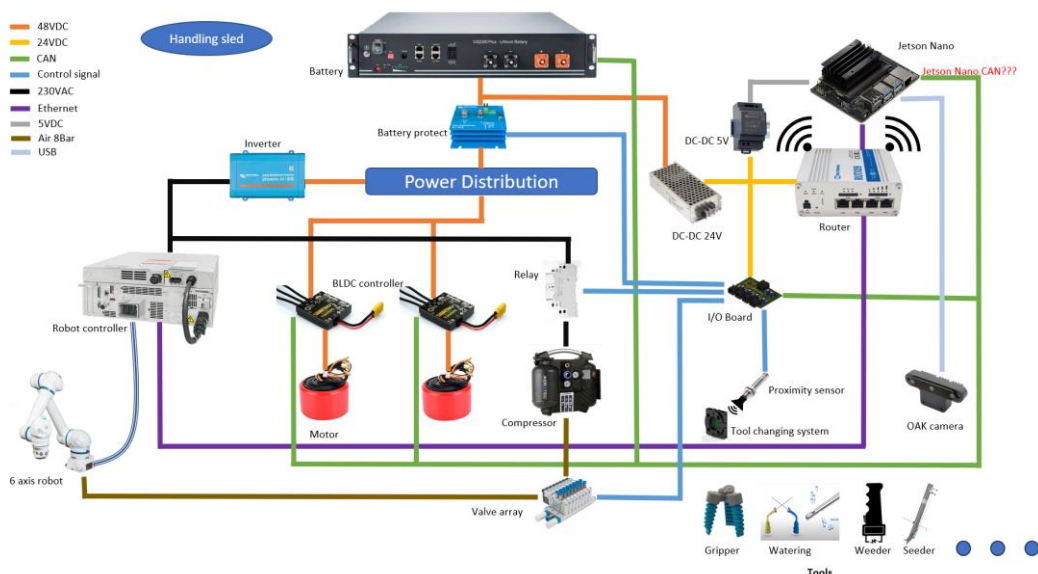


Abbildung 5: Elektrokonzept Schlitten

## Softwareentwicklung

Parallel zur Hardwareentwicklung wurde von Projektbeginn an die Softwareentwicklung vorangetrieben. Besonders in diesem Bereich hat das Projekt geholfen, die ursprünglichen Konzepte zu validieren und weiterzuentwickeln. Somit lässt sich die Steuerung des Gesamtsystems entsprechend Abbildung 6 in drei Teile unterteilen.

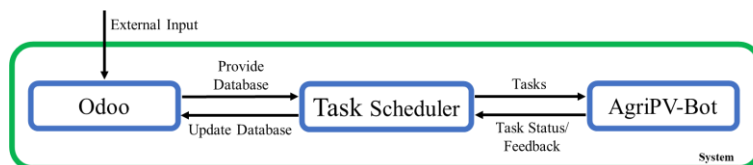


Abbildung 6: Steuerungskonzept des Gesamtsystems

Die Basis, um eine vollautomatisierte Einzelpflanzenkultivierung überhaupt zu ermöglichen, ist eine umfangreiche Datenbank. Dazu wurde das Open-Source ERP-System (Enterprise-Resource-Planning-System) Odoo als Ausgangspunkt herangezogen und zu einem Farm-Management-System mit Einzelpflanzenbetrachtung erweitert. Basierend auf der Datenlage ermittelt der Task Scheduler die anstehenden Aufgaben für den AgriPV-Bot, um diese an die Anlage zu übermitteln und zu überwachen. Am System selbst wird die Automatisierung in Form der einzelnen Sensoren und Aktuatoren über ROS (Robot Operating System) gesteuert.

Der Ansatz ein etabliertes Open-Source ERP-System wie Odoo als Ankerpunkt für die Datenerfassung zu nehmen, resultierte aus dem Bedarf der Landwirte nach ganzheitlichen Lösungen, anstatt weiterhin eine Vielzahl von Spezialanwendungen. Daher hat sich während der Projektlaufzeit herauskristallisiert, dass diese Plattform auch für die Anforderungen des AgriPV-Bots hervorragend geeignet ist. Abbildung 7 zeigt, wie die verschiedenen Module zur Einzelpflanzenkultivierung genutzt werden.

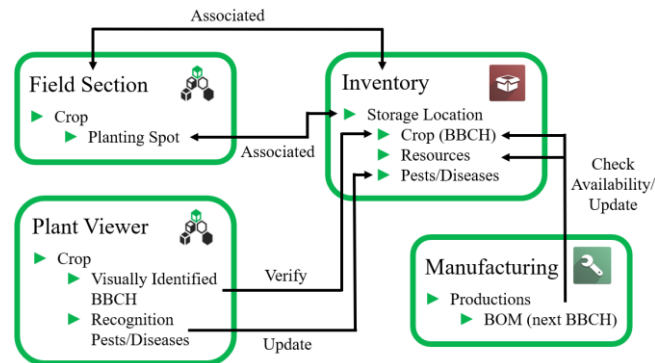


Abbildung 7: Modulübersicht in Odoo zur Einzelpflanzenkultivierung

So ergibt sich ein Zusammenspiel aus bestehenden Odoo-Modulen, wie Lager (Inventory) und Fertigung (Manufacturing) und eigens entwickelten Modulen, wie Ackerschlagkartei (Field Section) und Pflanzendatenbank (Plant Viewer). In der Ackerschlagkartei kann der Landwirt alle Felder in einer Übersicht darstellen, oder spezifische Feldflächen in der Detailansicht anzeigen, siehe Abbildung 8.



Abbildung 8: Ackerschlagkartei (Übersicht und Einzelfeldansicht)

Die Einzelfeldansicht zeigt eine beispielhafte Anordnung für den AgriPV-Bot. Die verschiedenen Größen und Farben an Punkten symbolisieren verschiedene Pflanzentypen in unterschiedlichen Wachstumsphasen. Ein einzelnes Feld wird im Rahmen des ERP-Systems als ein Lager angesehen, sodass jede Einzelpflanze logistisch gesehen einen definierten Lagerort innerhalb dieses Lagers anhand seiner Pflanzkoordinate erhält. Ziel ist es, für jeden dieser Lagerorte/Pflanzpunkte die vorhandenen Ressourcen wie Wasser und Nährstoffe zu erfassen und in der Datenbank zu hinterlegen. Somit können auf Basis dessen, analog zu einer industriellen Fertigung, Stücklisten angelegt werden, die zur „Produktion“ des nächsten Wachstumsschritt anhand der BBCH-Stadien der entsprechenden Pflanze benötigt werden. Dadurch kann das Wachstum auf dem Feld, was anhand von regelmäßigen Fotos dokumentiert wird, in der Datenbank simuliert, nachvollzogen und bei Bedarf können Kultivierungseingriffe definiert werden. Die Pflanzendatenbank wird dazu verwendet, dass alle Fotoaufnahmen der verschiedenen Pflanzen entsprechend abgelegt, aber bei Bedarf auch direkt in Odoo für die zur Pflanzenerkennung benötigten Erkennungsalgorithmen benötigte Maskierung vorgenommen werden kann, siehe Abbildung 9. Die Bilddaten selbst liegen in einem separaten Data Lake, auf den die Rohdaten vom AgriPV-Bot hochgeladen werden und auf diesen Odoo in Folge zugreift.

Zusätzlich werden in Odoo weitere Daten erfasst und verwaltet, wie beispielsweise Daten des Deutschen Wetterdienstes oder lokaler Sensoren am System, die für die Ermittlung der anstehenden Kultivierungsschritte durch den AgriPV-Bot benötigt werden.

Alle der beschriebenen Funktionen in Odoo wurden während der Projektlaufzeit aufgebaut. Damit ist die Entwicklungsarbeit noch bei weitem nicht abgeschlossen, auf dem Weg zu einer vollautomatischen Anlage, jedoch konnten alle relevanten technischen Prozesse getestet und weiter spezifiziert werden.



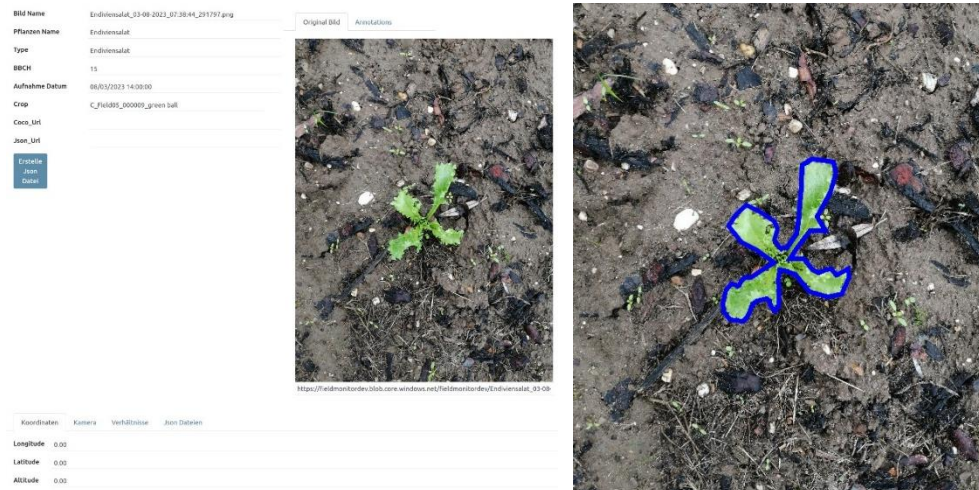


Abbildung 9: Pflanzendatenbank und Maskierung

Innerhalb der Gesamtentwicklung bis zur Serienreife wird die Automatisierung der Entscheidungsfindung der benötigten Kultivierungsprozesse durch den AgriPV-Bot eine dominante Rolle übernehmen. Zum einen müssen die entsprechenden Schritte identifiziert werden. Trivial sind dabei Fälle wie ein tägliches Foto jeder Pflanze, die konstant wiederkehrend sind. Ähnlich verhält es sich, dass falls im Webshop eine Gemüsebestellung eingeht, in der folgenden Nacht entsprechend geerntet wird. Aufwendiger ist beispielsweise die Bewässerung. Dazu wird ein Bodensensor die Feuchte messen, der Bedarf der betreffenden Pflanze im aktuellen Wachstumsschritt berücksichtigt und zuletzt die Niederschlagsvorhersage mit einbezogen. Eine andere Herausforderung ist die Pflanzplanung allgemein, exemplarisch die Entscheidung, welche Pflanze nach der Ernte neu gepflanzt werden soll. Dabei soll zum einen der prognostizierte Kundenbedarf, die Vorgängerbepflanzung, die Nachbarbepflanzung und der Zeitpunkt im Jahr berücksichtigt werden. Die komplexen Entscheidungsmodelle sind im Projekt bisher nur konzeptionell behandelt worden, da für eine zielgerichtete Implementierung die Datenlage und der allgemeine Reifegrad der Anlage im Status eines ersten Prototypens nicht ausreichend ist. Neben der reinen Ermittlung der Kultivierungsaktionen des AgriPV-Bots ist deren Ausführungsreihenfolge entscheidend für die Gesamteffizienz der Anlage. Diese Optimierung wird zukünftig aufgrund ihrer Vielzahl an Freiheitsgraden einiges an Rechenzeit in Anspruch nehmen. Ein einfacher Fall für eine reine Fahrplanung, um für die täglichen Bonitur alle Pflanzpunkte möglichst energieeffizient anzufahren, ist in Abbildung 10 gezeigt.

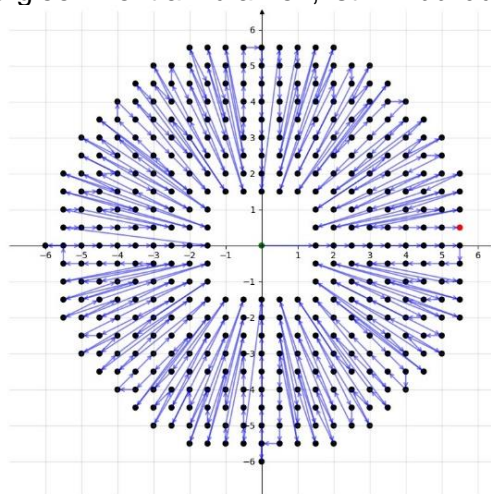


Abbildung 10: Fahrplanung für Bonitur

Diese sehr strukturierte Planung der Aufgabenabfolge wird während der Weiterentwicklung konfuser werden, durch Parameter wie unregelmäßigere Pflanzabstände, zeitliche Einschränkungen oder unterschiedliche Priorisierung.

Innerhalb dieses Projekts hat in der Softwareentwicklung jedoch die Arbeit in ROS, also der unmittelbaren Steuerung und Überwachung des Systems auf dem Feld, den größten Anteil eingenommen. Zu diesem Zweck wurden für jegliche Prozesse State Machines aufgebaut, die die verschiedenen Zustände des Systems und deren Abfolge eindeutig beschreiben. Zu Beginn wurde dies, wie in Abbildung 11 dargestellt, grob für den Gesamtprozess erstellt, um auf dieser Basis strukturiert die Teilprozesse beschreiben zu können.



Abbildung 11: State Machine - Gesamtsystem

Als Beispiel dient hier der Ernteprozess in Abbildung 12, ausgehend davon, dass Traverse und Schlitzen schon in richtige Position gebracht worden sind und die Greifposition identifiziert ist.

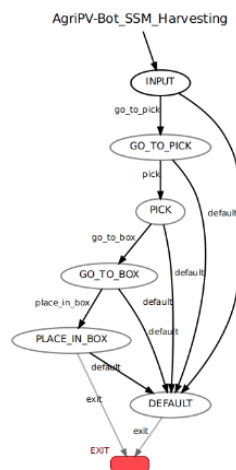


Abbildung 12: State Mashine - Ernte

Um diese Abläufe bereits parallel zur Auslegung der mechanischen Komponenten zu erproben, wurde entsprechend in einer Simulationsumgebung ein digitaler Zwilling des AgriPV-Bots aufgebaut. Dabei wurde die Struktur zunächst vereinfacht dargestellt, da diese noch nicht definiert war, aber dennoch die grundlegenden Abläufe untersuchen zu können. Abbildung 13 zeigt beispielhaft einen Greifprozess des AgriPV-Bots in der verwendeten Software Gazebo. Insgesamt kann die Bewegung der Gesamtanlage, aber auch, wie links in der Abbildung zu sehen, die Perspektive der einzelnen Sensoren abgebildet werden. So können am digitalen Zwilling des Systems bereits große Teile der Software parallel zur Hardware entwickelt werden, bevor der Transfer auf die reale Anlage erfolgt.

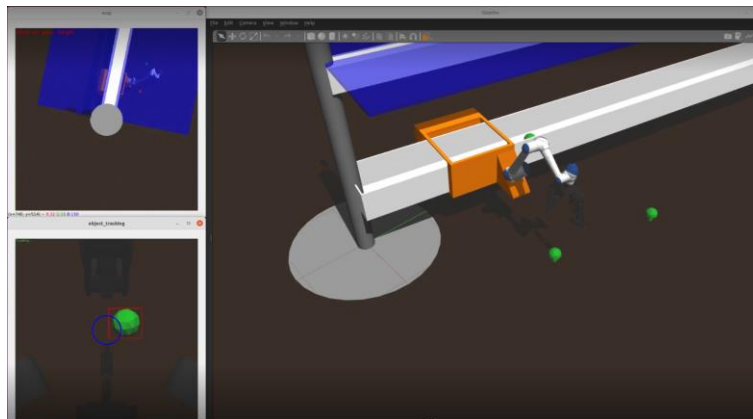


Abbildung 13: Erste Greifprozesse in der Simulation

Die Simulation wurde schrittweise erweitert (siehe Abbildung 14), durch das Hinzufügen der Erntekisten in der Haupttraverse, der Implementierung des Werkzeugwechselsystems auf dem Schlitten und der Schwenkbarkeit der PV-Paneele. Damit konnten in der Simulation alle benötigten Prozesse für den Betrieb der Anlage abgebildet werden.

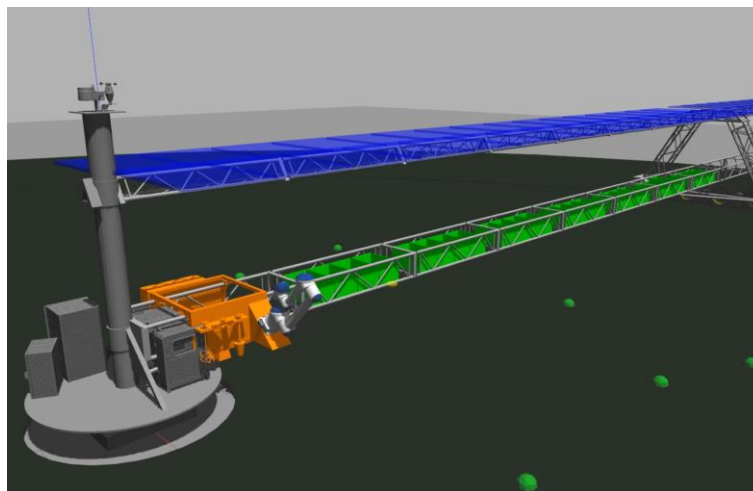


Abbildung 14: Erweiterung der Simulationsumgebung

Als Resultat dieser frühzeitigen Simulationen konnten die Einzelprozesse und deren Zusammenspiel frühzeitig virtuell erprobt werden. Dabei ergab sich die Erkenntnis, dass eine Trennung der Kultivierungsfunktionen von einem auf zwei Schlitten effizienter ist. Daher wurde das zu Projektbeginn vorliegende Konzept weiterentwickelt, sodass jeder Schlitten einseitig auf der Traverse und autonom operieren soll. Somit kann das System perspektivisch nahezu beliebig in der Größe skaliert werden. Im Detail werden auf der einen Schlittenvariante die Prozesse abgebildet, die wenig Freiheitsgrade benötigen, die Bodenbearbeitung, die Bewässerung, die Düngung und die Pflanzung der Setzlinge. Die zweite Schlittenvariante besteht aus aktuell einem Roboterarm inklusive Werkzeugwechselsystem, um die Ernte und

Unkrautregulierung zu erledigen. Wie in der Hardwareentwicklung bereits beschrieben, wurden beide Schlittenversionen aufgebaut und entsprechend auch die Simulationsumgebung auf den aktuellen Stand angepasst. Abbildung 15 zeigt entsprechend den digitalen Zwilling des aktuellen Prototypens mit allen Details in der realistischen Umgebung des Testfeldes aus dem Jahr 2023.

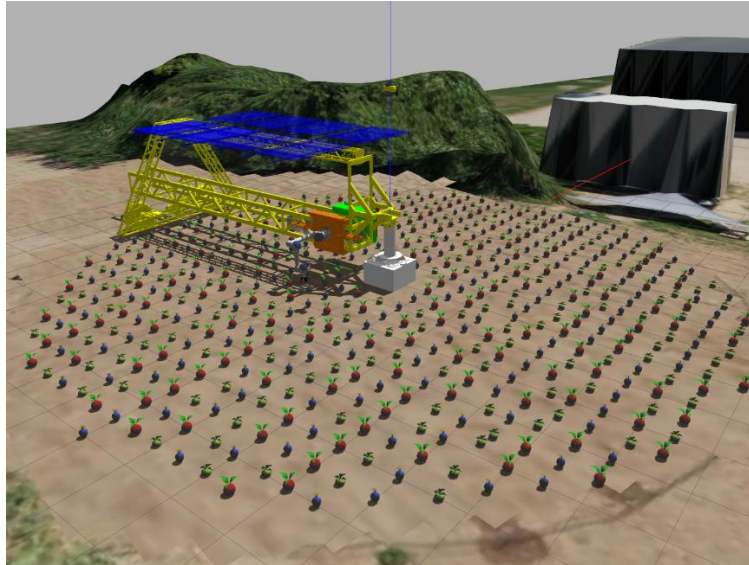


Abbildung 15: Digitaler Zwilling des Prototypens

### Realisierung des Versuchsaufbaus

Die Realisierung des Versuchsaufbaus startete zu Beginn des Jahres 2023 noch in der Halle, siehe Abbildung 16. Dabei wurden vorwiegend die Strukturbauteile zusammgebaut und zusätzlich beispielsweise Montagevarianten für die PV-Paneele und den Roboterarm getestet. Zu diesem Zeitpunkt wurden die elektronischen Komponenten noch nicht verbunden, um zunächst die reine Mechanik zu validieren.



Abbildung 16: Erstimplementierung in Halle

Im Frühling 2023 wurde diese erste Testanlage auf dem Testfeld aufgebaut und erste Pflanzen gepflanzt, siehe Abbildung 17. Im Vergleich zu der vorherigen Abbildung ist ersichtlich, dass

in der Zwischenzeit beispielsweise die Montageanordnung des Roboterarms als Ergebnis der ersten Tests angepasst wurde.



Abbildung 17: Testfeld im Frühjahr 2023

Im Zuge der Aufstellung auf dem Testfeld wurden neben den mechanischen Komponenten auch die ersten mechatronischen Bauteile in Betrieb genommen. Der Hauptantrieb und der Schlittenantrieb konnten manuell gesteuert werden. Zudem wurde ein witterungsbeständiger Schaltschrank im Bereich der Pivotsäule implementiert (s. Abbildung 18). Darin befindet sich temporär die Steuerung für das GEM-Modul auf dem Schlitten, bevor diese in der nächsten Iteration in den Schlitten integriert werden soll. Zusätzlich wurden die ersten vier PV-Paneele in Betrieb genommen und die zugehörigen Komponenten aus Batteriesteuerung, Batterie und Wechselrichter in den Schaltschrank integriert. Mit diesem Schritt konnte Netzanschluss vom Feld entfernt werden und die anschließenden Tests allein durch die PV-Paneele gespeist werden.



Abbildung 18: Schaltschrank an Pivotsäule

Im weiteren Verlauf wurde der zweite Schlitten in Betrieb genommen, der zunächst mit einem manuellen Setzlingswerkzeug und einem elektrischen Erdbohrer zur Bodenvorbereitung ausgestattet wurde. Beide Schlitten sind zum jetzigen Zeitpunkt noch für den Betrieb auf eine Kabelverbindung zur Batterie im Pivot angewiesen. Im weiteren Verlauf der Entwicklung werden diese zeitnah auf Batteriebetrieb umgestellt. Abbildung 19 zeigt den Prototypen des zweiten Schlittens und einen Eindruck des Testfeldes im Jahresverlauf mit Teilen des angepflanzten Gemüses als wichtigen Teil der Realisierung des Versuchsaufbaus.



Abbildung 19: Zweiter Schlitten und Testfeld im Jahresverlauf 2023

Wie in der Beschreibung der Hardwareentwicklungen bereits angedeutet, wurde mit dem Ende der Feldsaison 2023 eine neue Iteration an Schweißtraversen angestoßen. Als Folge konnten die beiden Segmente aus Profilsystemen als Indoor-Teststand für die Wintermonate umfunktioniert werden. Der Teststand, siehe Abbildung 20, dient im speziellen der Sensorerprobung vor dem Einsatz im Freiland und der Optimierung der Prozesse des Roboterarms.

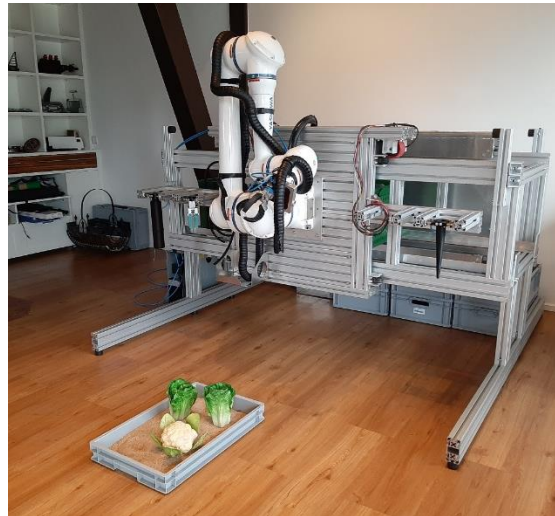


Abbildung 20: Teststand für Laborversuche

Mit dem Jahresstart 2024 ist die AI.Land GmbH an einen neuen Standort umgezogen. Dadurch wurde der Prototyp des AgriPV-Bots inzwischen für die anstehende Saison auf eine neue Testfläche umgesetzt. Auf Abbildung 21 ist im Vergleich zu den vorherigen Abbildungen die Umstellung auf eine durchgängige Schweißtraverse ersichtlich.



Abbildung 21: Testfeld 2024

## Laborversuche und Feldtests

Die Durchführung der Laborversuche und Feldtests sind im Frühjahr 2023 angelaufen. Während in den Sommermonaten ein Großteil der Tests im Freiland erfolgte, wurden mit dem Indoor-Teststand auch die Wintermonate für die Robotik genutzt. Die ersten Tests untersuchten die Antriebe für Hauptfahrwerk und Schlitten sind. Es bestätigte sich die Annahme, dass der allgemeine Energiebedarf für die Bewegung der Feldbewirtschaftungseinheit (hier Schlitten) über das Feld mittels des langsamen Hauptantriebs mit wenig Laufleistung im direkten Feldeingriff in Kombination mit der hohen Laufleistung des Schlittens auf der Führungsschiene im Vergleich zur konventionellen Feldbewirtschaftung deutlich reduziert werden kann. Beispielsweise benötigt der Hauptantrieb im Realbetrieb lediglich 150W. Da der Hauptantrieb eine bereits langjährig erprobte Komponente aus der Beregnungstechnik ist, ist diese Angabe verlässlich. Bei der Untersuchung der übrigen Komponenten ist jedoch ein großes Fehlerpotential für Rückschlüsse auf ein Energiekonzept in Serienreife vorhanden. Durch den Status als erster Prototyp des AgriPV-Bots wurden meist schnell verfügbare und leicht integrierbare Komponenten ausgewählt, um die allgemeine Funktionsweise zu validieren, um daraus Rückschlüsse auf die Weiterentwicklung zu ziehen. Daher sind weder die elektrischen Komponenten hinsichtlich ihrer energetischen Verbräuche optimiert noch die Prozesse selbst in ihrer Dauer. In Summe lassen die ermittelten Energieverbräuche keine verlässlichen Rückschlüsse auf den Gesamtenergiebedarf eines skalierten Systems auf größere Radien und optimierte Prozessabläufe zu. Daher wurde im Projektverlauf von einer detaillierten Energieanalyse Abstand genommen, um den exakten Bedarf an Solarpaneelen zu ermitteln. Auf der anderen Seite hat die Integration der bisher installierten vier Solarpaneele reibungslos und die Energiegewinnung seitdem ausfalllos funktioniert. Da die Skalierung von Solaranlagen übliche Praxis ist, erwarten wir in der weiteren Entwicklung damit keine Probleme. Dabei ist die Umstellung und Erweiterung auf bifaziale Glas-Glas Module bereits eingeleitet. Neben der daraus resultierenden Effizienzsteigerung in der Energiegewinnung wurde die Schwenkbarkeit der Module in Abgrenzung zur aktuell statisch horizontalen Ausrichtung in der Entwicklung etwas zurückgestellt. Bei bewölktem Wetter und damit verbundenem diffusen Licht ist die horizontale Ausrichtung die beste Wahl und der Mehrwert an sonnigen Tagen muss zunächst mit einer detaillierten Bedarfsanalyse für den autarken Betrieb des Systems in Kombination mit der Auslegung des Batteriespeichers verifiziert werden. Insgesamt bleibt jedoch festzuhalten, dass aus der energetischen Betrachtung vieles für einen allgemeinen Betrieb von Agrarrobotik unter einem semi-mobilen Ständerwerk für AgriPV spricht, um aus Solarenergie direkt frisches Gemüse zu produzieren.

Neben den allgemeinen Systemtests wurden auch die einzelnen Kultivierungsschritte erprobt. Als erste Testobjekte werden nicht reale Pflanzen, sondern Plastikbälle verwendet, um die

Prozesse des Anbauzyklus zu untersuchen. Abbildung 22 zeigt beispielsweise erste Ergebnisse vom Feld, wie die Kombination aus Stereokamera mit RGB-Kamera bei der Pflanzenerkennung helfen kann und gleichzeitig die benötigten Größen-, bzw. Tiefeninformationen für die automatisierte Kultivierung liefert.

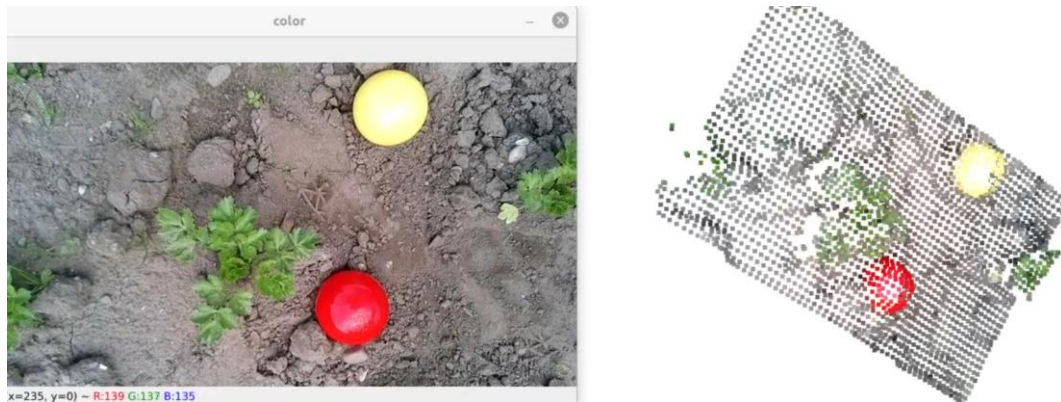


Abbildung 22: Erste Sensortests auf dem Feld

Bei der Gestaltung des Testfelds waren zwei Faktoren wichtig. Auf der einen Seite ausreichend Pflanzen für die Feldtests zu haben, auf der anderen Seite die Vision des vollautomatisierten gemischten Gemüsebaus interessierten Besuchern veranschaulichen zu können. Daher wurde ein Teil des Felder mit bewusst unterschiedlichen Kulturen bepflanzt, um dies für Marketingzwecke zu verwenden. Der übrige Teil wurde bevorzugt mit Kohlrabi bepflanzt, da diese den Vorteil haben, dass sie relativ leicht von anderen Kulturen zu unterscheiden ist und zugleich robust im Handling sind. Daher wurde als erstes im Rahmen der automatischen Bildererkennung mit Machine Learning der Algorithmus auf Kohlrabi trainiert, siehe Abbildung 23.

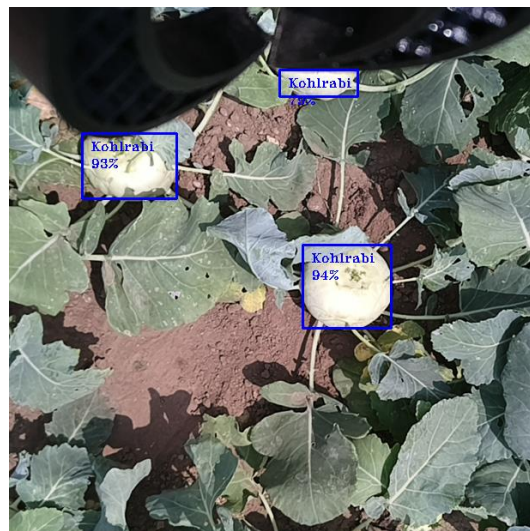


Abbildung 23: Kohlrabierkennung auf dem Testfeld

In Zukunft müssen die Erkennungsalgorithmen noch deutlich erweitert werden, um zum einen eine Vielzahl von verschiedenen Kulturen an sich, als auch jeweils deren Wachstumsstadien erkennen zu können. Da beides jedoch bereits Stand der Technik ist, sehen wir darin kein Risiko für die allgemeine Entwicklung des Systems. Die Ernterversuche an realen Pflanzen wurden dementsprechend auch an Kohlrabi durchgeführt, siehe Abbildung 24.





Abbildung 24: Kohlrabiernte auf dem Testfeld

Zusätzlich wurden nach Inbetriebnahme des zweiten Schlittens die punktförmige Bodenvorbereitung und Setzlingspflanzung anhand von Kohlrabi getestet (Abbildung 25).



Abbildung 25: Bodenvorbereitung und Pflanzung auf dem Testfeld

Die Tests der Bewirtschaftungswerkzeuge verliefen durchweg vielversprechend, auch wenn die einzelnen Anwendungen natürlich noch einige Iterationen bedürfen, um vollautomatisiert und robust ihre Aufgaben zu erledigen. Aber speziell am Beispiel der punktförmigen Bodenbearbeitung wird das Potential der Punktbewirtschaftung im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft, in der mit schwerem Gerät unter gewaltigen Energieeinsatz regelmäßig die komplette Feldfläche umgepflügt wird, ersichtlich.

Nach Ende der Feldsaison 2023 wurde in den verbleibenden Projektmonaten im Winter Robotiktests am Indoor-Teststand fortgesetzt. Beispielhaft in Abbildung 26 gezeigt ist ein Testaufbau, bei dem mehrere grüne Plastikbälle als Gemüseattrappe in einer Kiste platziert werden. In einer späteren Abwandlung wurden auch verschiedenfarbige Bälle je nach „Kundenwunsch“ in unterschiedlichen Kisten platziert, um damit möglichst nah an das spätere Ziel der auf dem Feld konfektionierten Gemüsebox zu kommen.

Neben diesen meist bildlich gut darstellbaren Tests fanden zudem viele Tests im Bereich der Software statt. Die kompletten Schnittstellen zwischen ROS und den bisher implementierten Sensoren und Aktuatoren wurden erprobt. Die Schnittstelle von ROS zu Odoo war von übergeordneter Bedeutung, um das Gesamtkonzept des Systems validieren zu können. Alle genannten Schnittstellen konnten in der bisherigen Testphase erfolgreich eingerichtet und erprobt werden.



Abbildung 26: Robotiktests am Indoor-Teststand

Zusammenfassend waren die Tests sehr erfolgreich, da sich in keinem Teilsystem, weder in der Hard- noch in der Software, Probleme aufgetan haben, die in der Weiterentwicklung kritisch einzuschätzen sind.

## 4. Projektergebnisse

Viele der Teilergebnisse zu den einzelnen Systemkomponenten wurden bereits in der Beschreibung des Projektablaufs dargestellt. Daher soll in diesem Abschnitt vorwiegend auf die übergeordneten Projektergebnisse eingegangen werden.

Basierend auf einem reinen Konzept wurde innerhalb des Projekts wie geplant der erste Prototyp des AgriPV-Bots aufgebaut, gezeigt in Abbildung 27 auf dem Testfeld im Jahr 2023.



Abbildung 27: AgriPV-Bot auf Testfeld

Die synergetische Kombination von Photovoltaik und Agrarrobotik im Gemüsebau wurde dabei als gewinnbringend bewertet. Die semi-mobile Plattform ermöglicht durch ihr festes Mittelfundament und die dadurch gleichbleibende Fahrspur eine ausreichend stabile Struktur, um neben der Robotik auch die PV-Anlage für deren Versorgung zu tragen. So wird die auf dem AgriPV-Bot generierte elektrische Energie direkt für die Bewirtschaftung der darunter liegenden Feldfläche genutzt, anstatt in zumindest partieller Konkurrenz zu dieser zu stehen, wie bei einigen AgriPV-Konzepten. Aus der Perspektive der Robotik ermöglicht die Nutzung



der stabilen Traverse des AgriPV-Bots als erschütterungsarme Führungsschiene für den Schlitten eine Automatisierung im Freiland, die so nah wie möglich an industrieller Automatisierung ist. Daher kann der Fokus viel früher in Richtung der Entwicklung der einzelnen Kultivierungsprozesse gehen, im Vergleich zu kleineren mobilen Konzepten, die zunächst sicher auf der Ackerfläche navigieren können müssen und deutlich mehr erschwerende, umgebungsbedingte Bewegung an den Prozesswerkzeugen erfahren. Die Solarpaneele erfüllen außerdem noch eine Schutzfunktion bei Starkregen für die darunter befindliche Robotik. Gleichzeitig können sie zum Auffangen und Sammlung des Regenwassers genutzt werden, um es im weiteren Kultivierungsverlauf als gezielte Bewässerung einzusetzen.

Neben dieser Bestätigung der Eingangshypothesen wurden wertvolle Erkenntnisse bezüglich der Umsetzbarkeit einer darauf aufbauenden Weiter- und Produktentwicklung gewonnen. Besonders das Logistikkonzept, zum einen auf dem Feld durch die Anlage selbst, aber auch die Notwendigkeit eines übergeordnetem ERP-Systems hat sich deutlich abgezeichnet. Als Resultat steht die Entscheidung, sich bei der Entwicklung vollends auf ROS für die Robotik und Odoo als Farm-Management-System festzulegen. Daher steht von der technischen Seite einer Produktentwicklung des AgriPV-Bots nichts im Wege, da alle wesentlichen Bausteine in sowohl Hard- als auch Software vorhanden sind und nun verfeinert, erweitert und verknüpft werden müssen.

Durch die hohe Komplexität des Gesamtsystems mit all seinen Teilkomponenten und Prozessschritten in aktuell vergleichsweise frühen Entwicklungsphasen lässt sich jedoch zum jetzigen Zeitpunkt der Mehrwert des AgriPV-Bots in Energieeffizienz und Ressourcenverbrauch gegenüber konventioneller Landwirtschaft oder auch mobilen Agrarrobotern nicht fundiert quantifizieren. Diese Analyse muss auf einen späteren Entwicklungszeitpunkt verschoben werden. Dennoch genügt in Abgrenzung zur konventionellen Landwirtschaft allein die Ermöglichung der punktförmigen Feldbewirtschaftung die Generierung eines enormen ökologischen Mehrwertes. Gegenüber den mobilen Plattformen zeichnet sich der AgriPV-Bot durch seine Variabilität in der Skalierung aus. Während diese meist Einschränkungen an Reichweite und Traglast haben, können diese Punkte beim AgriPV-Bot während der Entwicklung dem entsprechenden Erkenntnisstand angepasst werden, um die optimale Effizienz auf der Fläche zu erreichen. Zeitgleich unterliegt das semi-mobile Kreisbewirtschaftungssystem nicht den hohen Anforderungen eines vollmobilen Roboters im Bereich der Zulassung des autonomen Betriebs.

Unter all diesen Gesichtspunkten nimmt der AgriPV-Bot nach unserer Auffassung in den aktuellen Entwicklungen in der Landwirtschaft einen Sonderplatz ein, was uns auch von einigen Experten (siehe 5. Öffentlichkeitsarbeit) während der Projektlaufzeit bestätigt wurde. Auch wenn nur implizit mit dem Projekt verknüpft, ist erwähnenswert, dass inzwischen das Patent zum AgriPV-Bot (10 2021 134 075) erteilt wurde, als essenziell wichtiger Meilenstein für die mögliche Produktentwicklung des Systems.

## 5. Öffentlichkeitsarbeit

Bedingt durch die fortschreitende Patenterteilung während der Projektlaufzeit wurde auch schrittweise die Öffentlichkeitsarbeit hochgefahren, um den Bekanntheitsgrad des Projekts zu erhöhen. Dazu wurden ab 2023 zunächst vermehrt Konferenzen und kleinere Messen besucht. Für diese Zwecke wurden zum einen ein Flyer (Abbildung 28, Abbildung 29) und ein Roll-Up (Abbildung 30) erstellt. Im weiteren Verlauf wurde der AgriPV-Bot zu Vermarktungszwecken auch als DaVegi bezeichnet. Häufig sorgte besonders das Legomodell, siehe Abbildung 1Abbildung 31, für Aufsehen und ermöglichte aufschlussreiche und gewinnbringende Diskussionen. Als Folge dieser externen Termine erreichen uns seitdem vermehrt Anfragen von politischen Delegationen, der Landwirtschaftskammer, Unternehmen



und Landwirten, sich den Prototypen auf unserem Testfeld vor Ort anzuschauen und erklären zu lassen. Das bisher erfreulicherweise einstimmige Feedback aus zahlreichen Gesprächen ist, dass der AgriPV-Bot als potentialträchtige Entwicklung für die Landwirtschaft wahrgenommen wird, gegen den bis heute keine konzeptgefährdenden Argumente vorgebracht werden konnten.

Bestätigt wurden diese Eindrücke durch den Gewinn des Innovationspreis Moderne Landwirtschaft 2023, der der AI.Land GmbH auf der Grünen Woche in Berlin verliehen wurde (<https://www.innovationspreis-landwirtschaft.de/gewinner-und-finalisten-2023/>).

**AI.Land GmbH**  
Merging Nature and Technology.



**Field2Fork**  
Strategie zur Direktvermarktung von Gemüseboxen

Als Brückentechnologie ermöglicht der AgriPV-Bot alle pflanzenbaulichen Prozesse des Gemüsebaus ökologisch und ökonomisch zu automatisieren.

**AgriPV-Bot**  
Synergetische Kombination von Agrarrobotik und Photovoltaik



---

**Allgemeine Informationen**

Die AI.Land GmbH ist ein Innovationstreiber im Smart-AgTech Bereich. Wir sind spezialisiert auf Entwicklung von Hard- und Software für die Automatisierungstechnik in der Landwirtschaft.

Unser Ziel ist die Vollautomation in Gemüsekulturen.

Dafür legen wir den Fokus auf Entwicklung, Produktion und Vermarktung unseres mobilen ETAROB Mehrzweck-Agrarroboters. Auf dem Weg dorthin dient der semi-mobiler AgriPV-Bot als Basisstation für die Logistik und als Brückentechnologie für die energieautarke Vollautomation im Gemüsebau. Viele der daraus entspringenden Entwicklungen und Erkenntnisse, wie beispielsweise Werkzeuge oder Pflanzendaten, können anschließend direkt auf mobile Systeme übertragen werden.

Die AI.Land GmbH ist eine Ausgründung aus dem Institut für mobile autonome Systeme und kognitive Robotik (MASKOR) der FH Aachen.

**Produkt**



**Kontakt**

AI.Land GmbH  
Josef Franko & Simon Maiké  
Siebenhäuser 7 | 47906 Kempen  
M +49 176 811 950 48 | [info@a-land](mailto:info@a-land)  
T +49 2845 980 2021  
[www.a-land](http://www.a-land)



gefördert durch



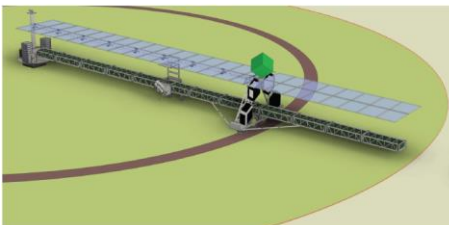
Deutsche Bundesregierung Umwelt







Abbildung 28: AgriPV-Bot Flyer Vorderseite


**AgriPV**  
Parallele Photovoltaik und Feldbewirtschaftung



**AgriPV + Robotik**  
Synergetische Kombination





**Vision**  
Optimale Nutzung von Synergien




---

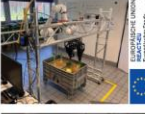
**Herausforderungen**


 20-30% Abschattung  
Eine *ertragsmindernde Abschattung* der Ackerflächen ist durch eine statische Photovoltaik in der Regel unvermeidlich.


 AgriPV-Systeme müssen für die erforderlichen Feldarbeiten mit konventionellen Anbaumaschinen *sehr hoch aufgeständert* werden.

 An der Ackerfläche sind Stromleitungen und *Netzanschlüsse erforderlich*, da die Energie nicht direkt vor Ort genutzt wird.

**Lösungsansätze**


 Das System bewegt sich inklusive der Photovoltaik über die bewirtschaftete Fläche und *reduziert* dadurch die statische *Verschattung*.

 Die PV-Tragstruktur dient gleichzeitig als Laufschiene für kompakte Agrarrobotik, sodass eine *hohe Aufständering* für konventionelle Landmaschinen *nicht erforderlich* ist.

 Durch die lokale Energieerzeugung erfolgt der *Gemüseanbau energieautark*. Der Lastausgleich wird mit einem System integrierten Batteriespeicher gelöst.

**Flächeneffizienz**

Während der Flächenverlust der reinen Kreisbewirtschaftung im Bereich des konventionellen Gemüsebaus liegt, kann eine teleskopierbare Traverse des rotierenden AgriPV-Bots das Flächenpotential nahezu komplett erschließen.



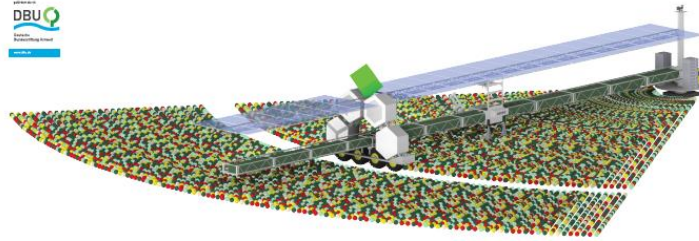
Δ - 15-20%    Δ - 22%    Δ - 3%

Abbildung 29: AgriPV-Bot Flyer Rückseite



# AgriPV-Bot

Synergetische Kombination von Agrarrobotik und Photovoltaik



### Spot-Farming Strategie



### Optimale Nutzung von Synergien



### Field2Fork

Strategie zur Direktvermarktung von Gemüseboxen



Individuelle Kundenbestellung



Lieferung



Gemischte Gemüseboxe

### Flächeneffizienz



Δ - 15-20%

Konventioneller Gemüsebau



Δ - 22%

Kreisbewirtschaftung



Δ - 3%

Kreisbewirtschaftung mit Teleskoptraverse



# AI.Land

Merging Nature and Technology.



AI.Land GmbH  
Siebenhäuser 7 | 47906 Kempen  
T +49 2845 980 2021 | info@ai-land  
www.ai-land

Abbildung 30: AgriPV-Bot Roll-Up



Abbildung 31: Legomodell

Abschließend wurden im Rahmen der Jahrestagung 2024 der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswissenschaft e.V. (GIL) zwei Kurzpapere veröffentlicht, die im Zusammenhang mit dem Projekt entstanden sind.

*Maike, Simon; Abbas, Farooq; Lee, Ting Sheng; Kühnast, Marvin; Weber, Bettina; Becker, Rolf; Franko, Josef (2024): Predictive task scheduler and ERP system for automated vegetable cultivation in an outdoor environment. 44. GIL - Jahrestagung, Biodiversität fördern durch digitale Landwirtschaft. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V.. PISSN: 1617-5468. ISBN: 978-3-88579-738-8. pp. 329-334. Stuttgart. 27.-28. Februar 2024*

*Weber, Bettina; Chande, Sahil; Maike, Simon; Verbunt, Maarten; Lee, Ting Sheng; Becker, Rolf; Franko, Josef (2024): Robotic process control for multi-vegetable micro spot-farming using digital twin simulation. 44. GIL - Jahrestagung, Biodiversität fördern durch digitale Landwirtschaft. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V.. PISSN: 1617-5468. ISBN: 978-3-88579-738-8. pp. 443-448. Stuttgart. 27.-28. Februar 2024*

## 6. Fazit/Ausblick

Das AgriPV-Bot-Projekt war aus Sicht der AI.Land GmbH ein voller Erfolg. Aus einem Konzept heraus konnte mit der Förderung der DBU der erste Prototyp des Systems erfolgreich aufgebaut werden. Die verschiedenen Teilsysteme der komplexen Anlage konnten erprobt und validiert werden. Dadurch konnte das Konzept während des Projekts weiter geschärft und viele Unwägbarkeiten konnten beseitigt werden. Die Hypothese einer synergetischen Kombination von Photovoltaik und Agrarrobotik im Gemüsebau konnte in diesem Zuge bestätigt und konkretisiert werden. Es wurden zwar nicht alle Teilziele erreicht, wie die weiterhin geplanten 24m Systemradius oder eine detaillierte Energiebedarfsanalyse, aber die positiven Aspekte überwiegen. So ermöglichte der Prototyp neben den technischen Erkenntnissen auch eine anschauliche und fundierte Diskussion des Konzeptes mit verschiedenen Stakeholdern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft vor Ort auf dem Testfeld. Dabei wurden bis heute weder technologische, wirtschaftliche noch soziale Aspekte gefunden, die eine Produktentwicklung oder eine spätere Marktakzeptanz ausschließen. Viel mehr ist die Resonanz, dass der AgriPV-Bot ein spannendes, zukunftsorientiertes Konzept ist, dass den benötigten Wandel der Landwirtschaft der Zukunft mitgestalten kann. Daher ist die AI.Land GmbH überzeugt davon, dass der AgriPV-Bot auch langfristig einen bedeutenden Platz im ihrem Produktportfolio zwischen smarten Traktorbaugeräten und voll-mobilen Mehrzweckplattformen haben wird (vgl. Abbildung 32).



*Abbildung 32: Prototypen der AI.Land GmbH*

Durch die Gesamtheit der Erkenntnisse aus technischen Untersuchungen und Expertengesprächen, aber auch nicht zuletzt durch die Patenterteilung (10 2021 134 075), möchte die AI.Land GmbH die Entwicklung des AgriPV-Bots auch über dieses Projekt hinaus weiterentwickeln. Dazu wurde bereits erfolgreich ein zweijähriges Folgeprojekt beantragt, das im Juni 2024 starten soll. Innerhalb dieser zwei Jahren soll das Gesamtsystem auf einen Technologiereifegrad gehoben werden, der eine belastbare Szenarienplanung zulässt, um eventuell benötigte externe Investoren für die abschließende Fertigung und Markteinführung gewinnen zu können.