

Abschlussbericht

Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft
(EIP Agri)

Operationelle Gruppe: WaterWise

autonomes System zur sparsamen Bewässerung im Ackerbau
unter Einbindung regenerativer Energien bei gleichzeitiger
Schonung der Grundwasserreserven

K. Müller¹, B. Johanning², H.-J. Pfisterer², H. Jahn², V. Brunstein², M. Wagner², H. Frhr. von Münchhausen³,
M. Budde-von Beust³

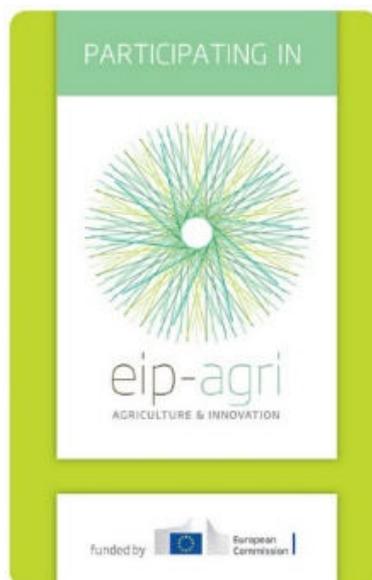
¹ Dr. Kathrin Müller, Hof Fleming, Ehrener Kirchweg 6, 49624 Lönigen

² Hochschule Osnabrück, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück

³ Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V., An der Burg 3, 38378 Warberg

Projektlaufzeit: 15.02.2021 – 15.08.2024

Registriernummer: 276034040000357



Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	3
1 Kurzdarstellung	6
1.1 Ausgangssituation und Bedarf	6
1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung	7
1.3 Mitglieder der OG	8
1.4 Projektgebiet.....	9
1.5 Projektlaufzeit und Dauer	9
1.6 Budget.....	9
1.7 Ablauf des Verfahrens.....	9
1.8 Zusammenfassung der (erwarteten) Ergebnisse	11
2 Eingehende Darstellung	11
2.1 Verwendung der Zuwendung.....	11
2.1.1 Gegenüberstellung Geschäftsplan und tatsächlich durchgeführte Teilschritte.....	11
2.1.1.1 Konzeptphase (AP1).....	12
2.1.1.2 Aufbauphase (AP2).....	12
2.1.1.3 Feldtest (AP3).....	13
2.1.1.4 Auswertung der Feldtests (AP4).....	13
2.1.1.5 Projektmanagement / Öffentlichkeitsarbeit (AP5)	14
2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen.....	14
2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn	15
2.2.1 Ausgangssituation	15
2.2.2 Projektaufgabenstellung	15
2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf	16
2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet?	16
2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG?.....	16
2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen?.....	16
2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes.....	17
2.4.1 Zielerreichung	17
2.4.2 Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis	17
2.4.3 Projektverlauf.....	18
2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen	72
2.4.5 Nebenergebnisse	72

2.4.6 Arbeiten, die zu keiner Lösung/zu keinem Ergebnis geführt haben	74
2.4.7 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern.....	75
2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	75
2.6 Verwertung und Nutzung der Ergebnisse	76
2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	76
2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept.....	76
3 Literaturverzeichnis.....	80
Anhang A – Schematische Darstellung des konzipierten Energiesystems	81
Anhang B – Roboter Netzwerktopologie	82
Anhang C – Zustandsdiagramm des Arbeitsprozesses.....	83
Anhang D – Fotoserie des Arbeitsprozesses	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Mit PVGIS errechnete PV-Erträge bei der gewählten Anlagenkonfiguration.....	25
Tabelle 2: Wettercharakteristik der simulierten Jahre	28
Tabelle 3: Randbedingungen der Simulation.....	29
Tabelle 4: Simulationsergebnisse mit den ausgelegten Energiekomponenten	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die Arbeitspakete und ihre zeitliche Einordnung im Projektplan	12
Abbildung 2: Konzept Bewässerungseinheit	19
Abbildung 3: Konzept des Rahmens und Fahrwerkes	19
Abbildung 4: Konzept des Bewässerungsapparates	20
Abbildung 5: Rahmenkonstruktion für die Aufständigung der PV-Anlage.....	25
Abbildung 6: Konstruktion Betankungsarm (links) und Gestell für den Zwischentank (rechts)	27
Abbildung 7: Schematischer Überblick über das Simulationsmodell "Lokale Smart Grid Station"	28
Abbildung 8: Darstellung der Energiebilanzierung an Tagen mit Netzbezug	30
Abbildung 9: Finaler Rahmen und Fahrwerk (links: Vorderseite, rechts: Rückseite).....	31
Abbildung 10: Finales Tankmodul (links: Oberseite, rechts: Unterseite)	32
Abbildung 11: Finales Elektronikmodul (links: Oberseite, recht: Rechteseite).....	32
Abbildung 12: Schnittstellen des Elektronikmoduls (links: Fahrtrichtung rechts, rechts: Fahrtrichtung links)	33
Abbildung 13: Roboter zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)....	33
Abbildung 14: Zustandsdiagramm der Hauptzustände des Roboters	34
Abbildung 15: Energiesystem – Umrichter (links) – Energiespeicher (mitte) – Steuerung (rechts)	35
Abbildung 16: Wanddurchbruch für die Kabel	36
Abbildung 17: PV-Aufständigung im montierten Zustand	36
Abbildung 18: Montierte PV-Anlage auf der Ladestation.....	37

Abbildung 19: Aufbauarbeiten am Umzugstag.....	37
Abbildung 20: Wasserentnahmeschnittstelle - außen (links) - innen (rechts)	38
Abbildung 21: Grundwasserpumpe	38
Abbildung 22: Ausschnitt aus der Projekt-Webseite	39
Abbildung 23: Durchfahrt Betankungsvorgang (links: Anfahrt, mitte: Tankposition, rechts: Abfahrt)	40
Abbildung 24: Fahrspurregler	41
Abbildung 25: Ablauf Lenkungs kalibrierung	42
Abbildung 26: Eingemessene Punkte der Fahrstrategie	43
Abbildung 27: Entwurf der Ladeschnittstelle (links: gegen Fahrtrichtung, rechts: in Fahrtrichtung)...	44
Abbildung 28: Betankungsdüse - Schnittansicht (links) - 3D-gedrucktes Bauteil (rechts)	45
Abbildung 29: Wasseranschluss am Stationscontainer - außen (links) - innen (rechts)	45
Abbildung 30: Hauptansicht des Steuerungs dashboards	46
Abbildung 31: Kartenansicht im Steuerungs dashboard	46
Abbildung 32: Ladeschnittstelle (links: im Container, rechts: am Roboter)	47
Abbildung 33: simpler Ablauf eines Einzelzyklus	48
Abbildung 34: Display der Bewässerungseinheit.....	50
Abbildung 35: Vergleich der Spurplanungskonzepte (links: bisheriges Vorgehen, rechts: aktualisiertes Vorgehen)	51
Abbildung 36: Türöffner - Detailansicht (links) - Gesamtansicht (rechts).....	52
Abbildung 37: Türöffnungssensor im montierten Zustand	53
Abbildung 38: Aufbau der Zustandsmaschine der Stationssteuerung	56
Abbildung 39: Hauptansicht der Benutzeroberfläche	58
Abbildung 40: Kartenansicht der Benutzeroberfläche	58
Abbildung 41: Versuchsparzelle I	60
Abbildung 42: Versuchsparzelle II	61
Abbildung 43: Versuchsparzelle III	61
Abbildung 44: Versuchsparzelle III	61
Abbildung 45: Wiederholgenauigkeit der Arbeitsprozesse (links: Gesamtaufnahme der Feldreihen, rechts: Detailaufnahme einer Feldreihe).....	63
Abbildung 46: Wiederholgenauigkeit der Ladeleistung (links: Schlechte Ausrichtung, mitte: Übersicht der Ladeleistungen, rechts: Optimale Ausrichtung) ..	64
Abbildung 47: Leistungsbedarf des Bewässerungsapparates.....	64
Abbildung 48: Leistungsbedarf des Fahrentriebs	65
Abbildung 49: Verlauf der Lade- und Entladeleistung sowie des Batterieladezustands im Energiesystem der Versorgungsstation	66
Abbildung 50: Das Konzept WaterCycle	67
Abbildung 51: Die Arbeitspositionen des WaterCycles (links: Vorderansicht Reihenfahrt, rechts oben: mit Längsversatz, rechts unten: ohne Längsversatz) ..	68
Abbildung 52: Der Bewässerungsapparat des WaterCycles	69
Abbildung 53: Mögliche Dimensionierung des WaterCycles.....	70
Abbildung 54: „Gezielte sparsame Bewässerung mit einem Robotiksystem: Bernd Johanning demonstriert Ministerin Miriam Staudte auf dem Hof Fleming in Lönigen das Projekt <i>WaterWise-</i> <i>ASBA</i> “ Textquelle: ML, Bildquelle: ML/ Timo Jaworr	78
Abbildung 55: Gespräch mit Vertreterinnen und Vertretern der Landwirtschaftlichen Rentenbank sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern namhafter VC-Gesellschaften	78
Abbildung 56: Schematische Darstellung des Energiesystems.....	81
Abbildung 57: Roboter Netzwerktopologie	82
Abbildung 58: Zustandsdiagramm des Arbeitsprozesses	83

Abbildung 59: Fotoserie des Arbeitsprozesses (1/2)	84
Abbildung 60: Fotoserie des Arbeitsprozesses (2/2)	85

1 Kurzdarstellung

1.1 Ausgangssituation und Bedarf

Die Niederschlagsverteilung über das Jahr wird durch den prognostizierten Klimawandel deutlich ungleichmäßiger. Insbesondere längere Zeiten ohne Niederschlag beeinträchtigen die Ernte nachhaltig. Um Ernteverluste zu vermeiden, werden in der Landwirtschaft bereits heute Beregnungsmaschinen eingesetzt, die das Feld durch einen aus einer Düse austretenden Wasserstrahl großflächig beregnen. Nehmen die beregnungsintensiven Perioden zu, steigt der Wasser- und Energiebedarf der Flächen an. Dies führt zum einen zur Frage der Wirtschaftlichkeit, zum anderen aber auch zur Frage der Wasserverfügbarkeit, da die heutige Beregnungstechnik mit ihrer großflächigen und gleichmäßigen Verteilung die eingesetzte Wassermenge nicht optimal ausnutzt. Aus der Sicht des einzelnen Landwirts ergibt sich hieraus die Forderung nach Beregnungssystemen, die mit möglichst geringem Wasser- und Energieaufwand eine wirtschaftliche Bewässerung sicherstellen. Ergänzend besteht in niederschlagsarmen Perioden für eine Region auch die übergeordnete Forderung nach reduziertem Wasserverbrauch, um die Wasserverfügbarkeit nicht zu gefährden. Hier entsteht ein Zielkonflikt zwischen der klimabedingt intensiveren Bewässerung und einer Schonung der vorhandenen Wasserressourcen. Gleichzeitig stellt sich zunehmend die Frage nach dem Energieverbrauch pro genutzter Wassereinheit und die Art der Energiebereitstellung.

Bei der heute eingesetzten Beregnungstechnik wird die auszubringende Wassermenge für den gesamten Beregnungsbereich großflächig definiert. Auf die lokalen, teilweise großen Bedarfsunterschiede der Pflanzen kann nicht eingegangen werden. Die Beregnung selbst erfolgt über eine Düse, aus der ein Wasserstrahl austritt. Diese Beregnungstechnik führt zu einem erhöhten Wasserverbrauch, da für ein gutes Ernteergebnis deutlich mehr Wasser ausgebracht werden muss, als die Summe aller Pflanzen tatsächlich brauchen. Steigt klimabedingt die Anzahl der Beregnungsperioden, werden die regionalen Wasserressourcen überproportional in Anspruch genommen und gefährdet. Eine wirtschaftlich sinnvolle landwirtschaftliche Produktion ist durch die erhöhten Beregnungskosten und die hohe Wasserentnahme gefährdet. Im Rahmen des Vorhabens gilt es also ein Beregnungssystem zu entwickeln und dem Betreiber zur Verfügung zu stellen, dass die erforderliche Wassermenge gegenüber der herkömmlichen Technik deutlich reduziert.

Es gibt eine Vielzahl von Beregnungsmaschinen (z. B. mobile Beregnungsmaschinen und Kreisberegnungsmaschinen), deren Technik als ausgereift angesehen werden kann. Die Überwachung und Bedienung mobiler Beregnungsmaschinen und Pumpenanlagen erfolgt heute über Datenfernübertragung. Neuere Entwicklungen im Umfeld der Beregnungsmaschine beschäftigen sich mit dem Beregnungsmanagement, bei dem z. B. mit Hilfe von Bodenfeuchtemessungen und Wetterdaten der richtige Beregnungszeitpunkt und die einzustellende Wassermenge vorgegeben werden. Diese Systeme sind erst in Ansätzen cloudbasierte Softwarelösungen. Eine teilflächenspezifische Bewässerung auf breiter Ebene ist noch nicht möglich, allerdings kann auf dem hier vorhandenen Wissen aufgesetzt werden. Gleiches gilt für die jüngsten Entwicklungen im Bereich der Feuchtesensoren. Ein System das Wassermengen entsprechend dem aktuellen lokalen Bedarf der Pflanzen teilflächenspezifisch ausbringt, ist nach dem heutigen Stand der Technik zwar möglich, aber nicht verbreitet.

Ein möglicher Lösungsansatz eröffnet sich durch voranschreitende Automatisierungstechnik. Zur Entwicklung gehört eine Versorgungsstation, die überhaupt erst den angedachten autonomen Agrarprozess der Bewässerung ermöglicht und Agrarrobotik, die eine realistische Möglichkeit zur skalierbaren Umsetzung für die landwirtschaftliche Praxis eröffnet. Die Versorgungsstation lässt sich

dabei als mobile Feldscheune der Neuzeit verstehen, die den Roboter über alternative Energiequellen (Solar, Wind) mit Energie versorgt. Darüber hinaus ist der Roboter in der Lage, sich in der Versorgungsstation mit Wasser zu versorgen bzw. wird von dieser versorgt. Neben der Versorgungsstation ist die Weiterentwicklung bekannter Roboterkonzepte notwendig, so dass diese sich in der Station entsprechend mit Energie und Wasser versorgen können. Hierzu sind neue technische Konzepte für ein autonomes Trägerfahrzeug erforderlich. Das System soll darüber hinaus während der Bewässerung bei Bedarf auch Flüssigdünger teilflächenspezifisch ausbringen. Durch die Kombination der Arbeitsvorgänge Bewässerung und Düngung wird die Pflanzenverfügbarkeit des Düngers verbessert und die Grundwasserbelastung reduziert. Gleichzeitig wird damit die Wirtschaftlichkeit des Systems für den Betreiber verbessert. Die Steuerung der lokal auszubringenden Wasser- bzw. Düngermenge erfolgt durch ein Managementsystem, das z. B. auf der Basis der Onlinemessung der Bodenfeuchte, der Wetterdaten, der jeweiligen Pflanzenwachstumsphase und einer Bodenkartierung die benötigte Wassermenge errechnet. Ferner ist geplant, durch ein einfaches Verfahren des Beregnungssystems zwischen den Reihen, die Mobilität auf dem Feld zu erhöhen.

1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Das im Rahmen der OG *WaterWise* angestrebte Vorhaben verfolgt im Wesentlichen die folgenden Ziele:

- Entwicklung eines teilflächenspezifischen und autonom arbeitenden Bewässerungssystems
- Effizientes Wasser- und Energiemanagement
- Nutzung regenerativer Energiequellen

Die beschriebene Problemstellung erfordert einen interdisziplinären Lösungsansatz aus Landwirtschaft (Urproduktion, Versuchswesen) sowie Wissenschaft (Elektrotechnik, Automationstechnik, Fahrzeugtechnik und Maschinenbau). Ohne eine intensive Zusammenarbeit im Rahmen eines fokussierten Verbundvorhabens ist eine Lösung des komplexen Problems nicht zu erwarten, da die jeweiligen Fachdisziplinen nicht über das notwendige Gesamtwissen verfügen.

Die OG *WaterWise* beschränkt sich zunächst auf die Reihenkulturen wie Kartoffeln und Mais, da diese eine klare Orientierung im Feld mit sich bringen. Eine Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Kulturen sowie eine Skalierung (u.a. das Arbeiten in kleinen Roboterschwärmen oder größere autonome Fahrzeuge) bleibt Folgeprojekten vorbehalten.

Die Vision der OG *WaterWise* ist ein System, welches den Erfordernissen einer klimaangepassten Bewässerung Rechnung trägt, erneuerbare Energien nutzt und einen hohen Grad an Automatisierung bietet. Volatile Verfügbarkeit erneuerbarer Energien soll dabei über Smart Grids /Speicher optimal zum Einsatz gebracht werden. Das Demonstrator-System besteht aus einer Versorgungsstation und Agrarrobotik.

1.3 Mitglieder der OG

Insgesamt waren 3 Mitglieder an der OG *WaterWise* aus den Bereichen Landwirtschaft, Wissenschaft sowie Netzwerke beteiligt.

Hochschule Osnabrück Das beantragte Projekt wird auf Seite der Hochschule Osnabrück von Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pfisterer sowie Prof. Dr.-Ing. Bernd Johanning geleitet.

Die Kernkompetenzen von Prof. Dr. Hans-Jürgen Pfisterer liegen in der Leistungselektronik sowie der Entwicklung von energieeffizienten Antriebs- und Energiemanagementsystemen. Seine Arbeitsgruppe erforscht lokale Smart Grids und die dazu nötigen Energiewandler- und Energiespeichertechnologien. Die Kopplung von verschiedenen Energiesystemen bildet den Schwerpunkt (Power to Kinetik, Power to Heat und Power to Mobility). Neben den Forschungstätigkeiten ist er in der Entwicklung von Produkten der Leistungselektronik und energieeffizienter Antriebstechnik tätig.

Professor Pfisterer leitet den niedersächsischen Forschungsschwerpunkt „Energiespeicherlösungen für die Region Osnabrück-Steinfurt“. Im Projekt „LokSmart JETZT! 1 & 2“ werden von Herrn Pfisterer drei Demonstrationsanlagen lokaler Smart Grids mit bidirektionaler Anbindung von Elektrofahrzeugen erforscht, entwickelt und im Feldtest betrieben. Das Forschungsprojekt ChargePal beschäftigt sich mit der Entwicklung von mobilen Energiespeichern, die durch autonome Roboter für das Aufladen von elektrischen Fahrzeugen eingesetzt werden. Im Projekt NeXaT2H2 ging es um die Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Arbeitsmaschinen in der Landtechnik.

Gemeinsam mit der Universität der Bundeswehr München betreibt der Kollege Pfisterer das Grundlagenforschungsprojekt „Entwicklung, Aufbau und Test einer neuartigen elektronischen Schaltungstopologie zur Kombination von Batteriespeichersystemen, Batterie-Balancing-Systemen, Umrichtern und Ladeschaltungen 1&2“. Die Erforschung einer softwarekonfigurierbaren AC-Batterie, die direkt ohne weiteren Umrichter an Elektromotoren angeschlossen wird, ermöglicht innovative Antriebssysteme die u.a. in der Elektromobilität eingesetzt werden können.

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Johanning studierte Maschinenbau an der TU Braunschweig mit der Fachrichtung „Schlepper, Erdbau- und Landmaschinen“ und war im Anschluss als wissenschaftlicher Mitarbeiter und später als Oberingenieur am Institut für Landmaschinen der TU Braunschweig tätig. Im Jahr 1996 wechselte Prof. Johanning zur Firma Claas selbstfahrende Erntemaschine GmbH in Harsewinkel. Hier übernahm er zunächst die Leitung der Entwicklungsplanung und später die Leitung des Funktionsversuchs. 2001 folgte der Ruf an die FH Köln ans dortige Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien. Seit 2003 ist Prof. Johanning an der HS Osnabrück tätig und leitet hier das von ihm aufgebaute Labor für Landtechnik und mobile Arbeitsmaschinen. Im Labor für Land-technik und mobile Arbeitsmaschinen sind aktuell 10 wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt. 2014 erhielt Prof. Johanning die Forschungsprofessur „Fahrerassistenzsysteme für mobile Arbeitsmaschinen“ des Landes Niedersachsens aus der sich u.a. auch aktuell vielfältige Projektaktivitäten zu der Überschrift „autonomes Arbeiten und Fahren im Off-road-Bereich“ entwickelt haben.

Hof Fleming

Dr. Kathrin Müller, Hof Fleming, leitet einen landwirtschaftlichen Familienbetrieb in der Ortschaft Ehren, Stadt Lönigen. Das landwirtschaftliche Unternehmen betreibt Schweinemast, Pferdezucht, Ackerbau und Grünlandwirtschaft. Im Rahmen der OG *WaterWise* bringt der Hof Versuchsflächen ein, führt die Versuche auf dem Feld durch, nimmt kontextbezogene Daten auf und leitet notwendige Maßnahmen ein.

Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V.

Das Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. (NAN) wurde 2013 gegründet und vereint landwirtschaftliche Betriebe, Agrarunternehmen sowie Akteure aus Politik, Verwaltung und Forschung mit dem Ziel, einen nachhaltigen Ackerbau zu fördern. Aktuell hat das NAN 62 Mitglieder und vernetzt die Wirtschaftsakteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette, um voneinander zu lernen und technische Innovationen praxisreif zu machen.

Vor dem Hintergrund sich wandelnder Agrarmärkte und steigender gesellschaftlicher Erwartungen arbeitet das NAN an Lösungen, die den Ackerbau der Zukunft unterstützen. Als Träger des Ackerbauzentrums Niedersachsen bietet das Netzwerk eine Plattform, um Herausforderungen im Ackerbau zu adressieren.

Seit Februar 2024 ist das NAN am Projekt *WaterWise* beteiligt, mit dem Fokus, die Praxistauglichkeit und Skalierbarkeit der Ergebnisse zu prüfen und sie in die landwirtschaftliche Praxis zu übertragen.

1.4 Projektgebiet

Alle beteiligten OG Mitglieder haben ihren Sitz in Niedersachsen.

1.5 Projektlaufzeit und Dauer

Das Projekt wurde zum 15.02.2021 mit einer Projektlaufzeit von 3 Jahren und 2 Monate bis zum 30.04.2024 bewilligt. Bedingt durch Verzögerungen im Projektablauf sowie der Notwendigkeit weitere Daten aufzunehmen, erfolgte eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 15.08.2024. Die finale Projektlaufzeit erstreckte sich entsprechend über 3 Jahre und 6 Monate.

1.6 Budget

Die während der gesamten Projektlaufzeit tatsächlich geförderte Summe beträgt, inkl. des zum 15.08.2024 eingereichten Auszahlungsantrags, 431.369,70 €.

1.7 Ablauf des Verfahrens

Die OG *Waterwise* startete ihre Projektarbeit im Februar 2021 mit dem Konsortium, bestehend aus der Hochschule Osnabrück, dem Hof Fleming und dem Gut Arenshorst. Von Beginn an stellte die Corona-Situation eine besondere Herausforderung für das Vorhaben dar. Mit den staatlichen sowie betriebsindividuellen Auflagen aller am Projekt beteiligten Institutionen wurden persönliche Treffen der Akteure deutlich erschwert bzw. fast unmöglich. In den akuten Phasen der Pandemie haben lediglich bilaterale Treffen unter Einhaltung eines Hygienekonzepts stattgefunden. Letztendlich konnte nur so allen Auflagen nachgekommen werden. Regelmäßige Abstimmungen wurden online von Beginn bis zum Ende des Vorhabens durchgeführt. Innerhalb der ersten Projektphase wurde das Grundkonzept weiter ausgearbeitet und detailliert.

In der Aufbauphase wurde der Container an die Hochschule Osnabrück geliefert und dort mit dem Energiespeichersystem, der Steuerung und dem Wasserspeicher ausgerüstet. Es wurde die Version 1.1, 23.10.2024

Photovoltaik Anlage auf das Dach montiert und der Innenausbau abgeschlossen. Nach der Inbetriebnahme konnten die ersten Testläufe durchgeführt werden. Bei der Beschaffung des induktiven Ladesystems ist es zu starken Verzögerungen gekommen, wodurch die Integration und die Inbetriebnahme zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden mussten.

Der mobile Roboter wurde im Labor aufgebaut und programmiert. Nach der Inbetriebnahme des Roboters an der Hochschule, konnten die ersten Fahrversuche durchgeführt und die Kompatibilität mit der Ladestation geprüft werden.

Die Photovoltaik-Anlage wurde für den Transport abgebaut und verstaut, so dass der Container mit einer Spedition und einem entsprechenden Containerlastwagen zum Hof Fleming gebracht wurde.

Im Vorhinein wurde beim Hof Fleming ein Testfeld und entsprechende Infrastruktur vorbereitet. Der Container musste passend positioniert und die Photovoltaikanlage wieder aufgebaut werden. Mit der elektrischen Netzanbindung war es möglich das System Schritt für Schritt in Betrieb zu nehmen, unabhängig von der Wetterlage oder der Funktion des Gesamtsystems. Über die Internetanbindung war ein Remote Zugriff eingerichtet worden, mit dem auf das Ladesystem zuzugreifen und den Betrieb überwacht werden konnte. So war eine kontinuierliche Überwachung des Systems möglich und die Dienstreisen zur Versuchsanlage aufs nötigste reduziert werden.

Vor der containerinternen Garage und vor den Ladeschnittstellen wurde der Boden so präpariert, dass eine Verschlammung oder eine zu starke punktuelle Bodenbelastung keine negativen Auswirkungen für die Funktion und den Betrieb des Systems hat.

Mit diesen Vorbereitungen konnten die ersten Bewässerungsversuche auf dem Feld mit dem Roboter durchgeführt werden und das Laden mit Energie und Wasser getestet werden. Die Fahralgorithmen und der Bewässerungsablauf wurden kontinuierlich verbessert und erweitert, so dass ein reibungsloser autonomer Betrieb gewährleistet werden konnte.

In der Winterpause gab es ungewöhnlich kalte Tage und der isolierte Container kühlte unerwartet stark aus. Es wurden die Speicher deaktiviert, um mögliche Schäden zu verhindern. Durch eine starke Regenperiode stand das Versuchsfeld zeitweise unter Wasser und der Ladecontainer inklusive Roboter mussten aus dem Bereich entfernt werden. Nach der Winterpause und nach dem die Felder wieder abgetrocknet waren, wurde das System wieder aufgebaut und in Betrieb genommen. Das induktive Ladesystem konnte in der Zwischenzeit geliefert und damit integriert werden. Zusätzlich wurden die Garagentüren noch automatisiert. Mit diesen Optimierungen kann der Roboter selbstständig die Garage verlassen und sich autonom mit Strom versorgen, wodurch die Dauerversuche durchgeführt werden konnten.

Der Betrieb der Ladeinfrastruktur und des Bewässerungsroboters wurde wieder aufgenommen, wodurch die letzte Testphase mit Langzeittests erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Im weiteren Projektverlauf hat sich das OG Mitglied Gut Arenshorst aus dem Vorhaben zurückgezogen und die Versuche wurden ausschließlich auf dem Hof Fleming durchgeführt. In diesem Zusammenhang ist das Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. als OG Mitglied in das Vorhaben eingetreten.

Über das Netzwerk Ackerbau wurde die breite praktische Expertise nochmals verstärkt. Darüber hinaus konnte die Öffentlichkeitsarbeit gestärkt und die Projektergebnisse noch besser kommuniziert werden.

Das Projekt wurde zum Ende hin immer wieder interessierten Gruppen auf dem Hof Fleming vorgestellt.

1.8 Zusammenfassung der (erwarteten) Ergebnisse

Im Projekt WaterWise wurde ein autonomes, teilflächenspezifisches Bewässerungssystem in Form eines Demonstrators entwickelt, das auf regenerative Energien setzt und die Grundwasserressourcen schont. Hauptziel war die Entwicklung eines hochautomatisierten Roboters, der autonom Pflanzen bewässert und in der Lage ist auch Zusatzstoffe wie Flüssigdünger auszubringen. Das System nutzt ein GNSS-basiertes Spurführungssystem, um gezielt nach den Bedürfnissen der Pflanzen zu bewässern. Zusätzlich sorgen ein induktives Ladesystem und eine Photovoltaikanlage für einen energieautarken Betrieb.

Zu den wichtigsten Ergebnissen zählt die erfolgreiche Umsetzung der autonomen Bewässerung und des effizienten Wasser- und Energiemanagements. Herausforderungen wie Lieferverzögerungen und die Pandemie konnten durch eine Projektverlängerung überwunden werden. Die Erkenntnisse bieten eine Grundlage für künftige Anwendungen in der ressourcenschonenden Landwirtschaft. Darüber hinaus wurde ein Konzept für eine Skalierung auf Basis pflanzenspezifische Bedarfe erstellt.

In the WaterWise project, an autonomous, site-specific irrigation system was developed in the form of a demonstrator that relies on renewable energy and conserves groundwater resources. The main objective was to develop a highly automated robot that irrigates plants autonomously and is also able to apply additives such as liquid fertilizer. The system uses a GNSS-based guidance system to irrigate specifically according to the needs of the plants. In addition, an inductive charging system and a photovoltaic system ensure energy self-sufficient operation.

The most important results include the successful implementation of autonomous irrigation and efficient water and energy management. Challenges such as delivery delays and the pandemic were overcome by extending the project. The findings provide a basis for future applications in resource-conserving agriculture. In addition, a concept for scaling based on plant-specific requirements was developed.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung

2.1.1 Gegenüberstellung Geschäftsplan und tatsächlich durchgeführte Teilschritte

Der in **Abbildung 1** dargestellte Projektplan gibt einen Überblick über die im Geschäftsplan vorgesehenen Arbeitspakete (AP) des Projektes sowie den zeitlichen Rahmen. Im Folgenden erfolgt eine eingehende Darstellung der jeweils durchgeführten Tätigkeiten.

Arbeitspakete	Jahr 2021		Jahr 2022		Jahr 2023		Jahr 2024	
	Monat 2-12/2021	Monat 1-12/2022	Monat 1-12/2022	Monat 1-12/2023	Monat 1-12/23	Monat 1-12/24	Monat 1-8/24	Monat 9-12/24
AP 1: Konzeptphase 2/2021 - 7/2021	■	■						
AP 1.1: Konzeptentwicklung für Versorgungs- / Lade-Station und Ausbringfahrzeug	■	■						
AP 1.2: Erstellung eines zeitdiskreten Simulationsmodells "Lokale Smart Grid Station"	■	■						
AP 1.3: Simulation einer Saison (Wetterverhältnisse, Wasserbedarf, Energiebedarf, regenerative Energien)	■	■						
AP 1.4: Auslegung und Konstruktion Ausbringfahrzeug								
AP 1.5: Auslegung Energiespeicher, PV-Anlage, Wasserspeicher								
AP 2: Aufbauphase (08/2021 bis 04/2022)		■	■	■				
AP 2.1: Aufbau Station und Fahrzeug		■	■	■				
AP 2.2: Inbetriebnahme Station			■	■				
AP 2.3: Testbetrieb auf Campus				■	■			
AP 3: Feldtest (05/2022 bis 10/2022 und 04/2023 bis 09/2023 und 04/2024 bis 08/2024)				■	■	■	■	■
AP 3.1: Vorbereitung Feldtest (04/2022 und 04/2023)				■	■	■	■	■
AP 3.2: Feldtest Hof Fleming und Gut Ahrenshorst (05/2022 bis 10/2022 und 05/2023 bis 09/2023)				■	■	■	■	■
AP 4: Auswertung des Feldtests					■	■	■	■
AP 4.1: wissenschaftliche Datenauswertung / Ergebnisdiskussion (11/2022 und 10/2023)					■	■	■	■
AP 4.2: Systemoptimierung nach erster Feldsaison (12/2022 bis 03/2023)					■	■	■	■
AP 4.3: Entwicklung von Praxisanweisungen (Skalierungsempfehlung für Praxisanlagen) (11/2023 bis 12/2023)						■	■	■
AP 5: Projektmanagement (01/2021 bis 12/2023)	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5.1: Projektmanagement und-controlling, Öffentlichkeitsarbeit	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5.2: Dokumentation u. Berichte	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 1: Überblick über die Arbeitspakete und ihre zeitliche Einordnung im Projektplan

2.1.1.1 Konzeptphase (AP1)

In der ersten Phase des Projektvorhabens wurde die Erarbeitung von Konzepten für die mobile Bewässerungseinheit und die Versorgungsstation vorgesehen. Für die nachfolgend geplante Dimensionierung des Energie- und Bewässerungssystems erfolgt die Erstellung eines zeitdiskreten Simulationsmodells, anhand dessen Rückschlüsse auf den Energie- und Wasserbedarf des Demonstrator-Systems gezogen werden. Auf Basis der Simulationsergebnisse erfolgte anschließend Auslegungs- und Konstruktionsschritte der Station sowie der mobilen Einheit.

Bedingt durch die verspätete Einstellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters im Team Pfisterer verzögerte sich der Projektplan und es mussten Kompromisse getroffen werden, um weitere Zeitverzögerungen zu vermeiden und den entstandenen Zeitverzug zu kompensieren. Infolgedessen wurde beschlossen die Arbeitspakete AP1.4 „Auslegung und Konstruktion Ausbringfahrzeug“ sowie AP1.5 „Auslegung Energiespeicher, PV-Anlage, Wasserspeicher“ vorzuziehen und eine initiale Abschätzung bezüglich der Dimensionierung durchzuführen. Auf diese Weise konnten die zeitkritischen Bestellungen von Komponenten rechtzeitig erfolgen. Es wurde entschieden die Simulation im Nachhinein im Hinblick auf die Validierung der initialen Abschätzung zu nutzen und gegebenenfalls notwendige Anpassungen zu treffen. Die Erstellung des zeitdiskreten Simulationsmodells in AP1.2 ließ sich rechtzeitig im vorgesehenen Zeitraum abschließen. Die Durchführung der Simulation sowie die Auswertung in AP1.3 musste bedingt durch den Zeitverzug in den Anfang der Aufbauphase verschoben werden.

2.1.1.2 Aufbauphase (AP2)

Für die Aufbauphase wurde initial im Zeitraum vom 08/2021 bis zum 04/2022 der Aufbau sowie die Inbetriebnahme der Versorgungsstation und der mobilen Bewässerungseinheit vorgesehen.

Vorbereitend auf die im Mai 2022 geplanten Feldtests erfolgte ein Testbetrieb auf dem Hochschulcampus.

Bedingt durch die Verzögerungen im vorigen Projektzeitraum sowie durch längere Lieferzeiten von wichtigen Komponenten, wurde die Aufbauphase um zwei Monate bis zum Juli 2022 verlängert. In der Aufbauphase konnten die vorgesehenen Arbeitsschritte erfolgreich durchgeführt werden und der Umzug sowie der Aufbau der Anlage auf der Versuchsfläche erfolgen. Die aus der Konzeptphase verschobene Simulation eines saisonalen Betriebs wurde während der Aufbauphase nachgeholt.

2.1.1.3 Feldtest (AP3)

Die in diesem Arbeitspaket geplanten Versuchsphasen sollten während den Zeiträumen vom 05/2022 bis zum 10/2022 sowie vom 04/2023 bis zum 09/2023 stattfinden. Während dieser Phasen wurde das Gesamtsystem aufgebaut, erprobt und validiert. Im ersten Zeitraum, welcher auf Grund von Verzögerungen erst 07/2022 begann, beschränkten sich Versuchsinhalte auf die Funktionsüberprüfung der gewünschten Anforderungen. Hier sind bspw. die Kommunikation und Regelkreise des Tankvorganges entwickelt und erprobt worden.

Im weiteren Verlauf wurden mittels rudimentärer Spurplanungsalgorithmik die Funktionsweise des Arbeitsprozesses betrachtet. Alle Aspekte eines Arbeitsprozesses wurden zusammengeführt, um so einen kompletten Ablauf abbilden zu können.

Mit der bewilligten kostenneutralen Verlängerung des Projekts bis zum 15.08.2024, wurde der Projektplan um eine Testperiode im Zeitraum vom 04/2024 bis zum 8/2024 ergänzt. Hier wurde eine komplexere Spurplanungsalgorithmik etabliert, um den finalen Aufbau einiger Dauertests zu unterziehen.

Über alle Versuchsphasen hinweg wurden zudem pflanzenbauliche Versuche in Maisreihen durchgeführt. Dazu wurden in regelmäßigen zeitlichen Abständen neue Reihen angelegt, so dass immer eine ausreichende Anzahl an Jungpflanzen auf dem Feld zur Verfügung standen.

2.1.1.4 Auswertung der Feldtests (AP4)

Die Auswertungen der Feldtests erfolgten jeweils im Anschluss der vorangegangenen Versuchsphasen. Die in der Auswertung erlangten Daten wurden anschließend genutzt, um den Aufbau zu optimieren oder Praxishinweise zu entwickeln.

Die erste Systemoptimierung diente der Erweiterung der Teilsysteme, um einen kompletten Arbeitsprozess abbilden zu können. So wurde bspw. der stationsseitige Tankarm optimiert und eine Fahrstrategie der mobilen Bewässerungseinheit entwickelt.

Die kostenneutrale Projektverlängerung ermöglichte eine Weiterentwicklung des Gesamtsystems. Aspekte der Spurplanung, der Langzeitautonomie sowie ackerbauliche Aspekte konnten optimiert und validiert werden.

Die über alle Testphasen gesammelten Informationen wurden für ein umfassendes Skalierungskonzept genutzt. Über die Zusammenarbeit mit der LWK Niedersachsen konnte zudem eine umfangreiche Wissensbasis der aktuellen Bewässerungspraxis aufgebaut werden.

2.1.1.5 Projektmanagement / Öffentlichkeitsarbeit (AP5)

Das Vorhaben und die erarbeitenden Ergebnisse wurden wissenschaftlich und wirtschaftlich aufbereitet und veröffentlicht. Unter anderem konnten in Vorträgen und auf Tagungen das Vorhaben vorgestellt werden. Online wurde das Vorhaben über eine Projekthomepage dargestellt.

In Präsentationen in unterschiedlichen Netzwerken konnten die Ergebnisse kritisch diskutiert werden. Unter anderem besuchten der Staatssekretär für Digitalisierung a.D. Stefan Muhle, mehrere Gruppen von Berufsschullehrer:innen und eine niederländische Delegation das Vorhaben und informierten sich direkt vor Ort. Darüber hinaus wurde das Vorhaben immer wieder auch Landwirtinnen und Landwirten vorgestellt. Im Rahmen ihrer Sommerreise 2023 besuchte die Landwirtschaftsministerin Miriam Staudte den Hof Fleming und lies sich vor Ort das Vorhaben erläutern.

Der Abschlussbericht wurde im Juli und August 2024 erstellt. Gemeinsam mit dem letzten Auszahlungsantrag wurde dieser im September 2024 der Landwirtschaftskammer Niedersachsen übermittelt.

2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

Im Rahmen der halbjährlichen Festsetzungen der Auszahlungen wurde zwischen zwei unterschiedlichen Zuschussarten gemäß EIP-Richtlinie unterteilt. Beide Zuschussarten wurden zu 100 % gefördert. Die insgesamt geförderte Summe belief sich auf 431.369,70 €.

Die wichtigsten finanziellen Positionen innerhalb des Zuschusses für die Durchführung von Innovationsprojekten waren:

- Personalkosten bei den Projektpartnern
- Ausgaben für den Kauf oder Leasing von Instrumenten und Ausrüstungsgegenständen, soweit und solange sie für die Durchführung des Projekts genutzt werden
- Ausgaben für Reisekosten
- Ausgaben für Unterauftragnehmer zur Einholung weiterer externer Expertise.

2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

2.2.1 Ausgangssituation

Die Niederschlagsverteilung über das Jahr wird durch den prognostizierten Klimawandel deutlich ungleichmäßiger. Insbesondere längere Zeiten ohne Niederschlag beeinträchtigen die Ernte und die Qualitätseigenschaften der Ernteprodukte nachhaltig. Um dem zu begegnen, werden in der Landwirtschaft bereits heute Beregnungsmaschinen eingesetzt, die das Feld durch einen aus einer Düse austretenden Wasserstrahl großflächig beregnen. Nehmen die beregnungsintensiven Perioden zu, steigt der Wasser- und Energiebedarf der Flächen an. Dies führt zum einen zur Frage der Wirtschaftlichkeit, zum anderen aber auch zur Frage der Wasserverfügbarkeit, da die heutige Beregnungstechnik mit ihrer großflächigen und gleichmäßigen Verteilung die eingesetzte Wassermenge nicht optimal ausnutzt. Aus der Sicht des einzelnen Landwirts ergibt sich hieraus die Forderung nach Beregnungssystemen, die mit möglichst geringem Wasser- und Energieaufwand eine wirtschaftliche Bewässerung sicherstellen. Ergänzend besteht in niederschlagsarmen Perioden für eine Region auch die übergeordnete Forderung nach reduziertem Wasserverbrauch, um die Wasserverfügbarkeit nicht zu gefährden. Hier entsteht ein Zielkonflikt zwischen der klimabedingt intensiveren Bewässerung und einer Schonung der vorhandenen Wasserressourcen und ihrer Nutzung für außerlandwirtschaftliche Zwecke. Gleichzeitig stellt sich zunehmend die Frage nach dem Energieverbrauch pro genutzter Wassereinheit und die Art der Energiebereitstellung. Ein möglicher Lösungsansatz eröffnet sich durch voranschreitende Automatisierungstechnik, die überhaupt erst den angedachten autonomen Agrarprozess der Bewässerung ermöglicht und durch Agrarrobotik, die eine realistische Möglichkeit zur skalierbaren Umsetzung für die landwirtschaftliche Praxis eröffnet.

2.2.2 Projektaufgabenstellung

Die Zusammenarbeit zwischen Landwirtschaft, vorgelagerten Bereich und Wissenschaft schafft einen geeigneten Rahmen, um im Rahmen einer Operationellen Gruppe (OG) Automatisierungstechnologien zu entwickeln und so einzusetzen, dass eine weitere Effizienzsteigerung bei der Bewässerung ermöglicht werden kann. Zur Bewässerung von Kulturpflanzen wird eine individuelle Bewässerung mittels eines hochautomatisierten Roboters entwickelt. Laborübergreifend wird an der Hochschule ein Funktionsmuster entwickelt, was den Roboter mit Bewässerung und die Ladestation für Strom und Wasser beinhaltet.

Im Projekt sollen folgende Aufgaben gelöst werden:

- Elektrisch betriebener Roboter für den Wassertransport und die selbstständige und gezielte Bewässerung der Pflanzen / Pflanzenreihen
- Autonome Navigation des Bewässerungsroboters
- Erzeugung und Speicherung von regenerativer Energie für die Versorgung des Roboters
- Autarke Ladestation zur Bereitstellung von Wasser und elektrischer Energie mit der Möglichkeit für ein bedarfsorientiertes und autonomes Nachladen von Wasser und elektrischer Energie
- Remotezugriff für die Fernwartung
- Bereitstellung einer Werkstatt/Labor für die Überwachung und Entwicklung des Betriebs
- Die Ergebnisse werden kommuniziert und auch zugänglich gemacht.

2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf

2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet?

Die Zusammenarbeit der OG Mitglieder wurde über regelmäßige Treffen ermöglicht. Die Corona-Situation stellte für den fachlichen Austausch der Mitglieder der OG *WaterWise* eine lösbare Herausforderung dar. Um die kontinuierliche Zusammenarbeit auch in dieser Phase zu ermöglichen, wurde verstärkt mittels MS Teams und Zoom kommuniziert. Die Installation der Technik vor Ort wurde gemeinsam gestaltet. Die Versuche wurden gemeinsam durchgeführt und darüber hinaus remote auf die einzelnen Komponenten zugegriffen.

2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG?

Die beschriebene Problemstellung erfordert einen interdisziplinären Lösungsansatz aus Landwirtschaft (Versuchswesen), Netzwerke (Kommunikation), Fahrzeug und Elektronik-Entwicklung, Funktionsmusterbau sowie Wissenschaft (Energietechnik, Robotik, Informatik). Erst durch die Zusammenarbeit als Operationelle Gruppe konnten die einzelnen Arbeitspakete bearbeitet und die Ziele erreicht werden. Die einzelnen OG Mitglieder verfügen grundsätzlich über das notwendige Wissen und die Mittel den vorgestellten Lösungsansatz erfolgreich umzusetzen. Dies wurde bereits im Auswahlprozess berücksichtigt, so dass sich die OG nicht zufällig formierte, sondern ganz gezielt notwendige Kompetenzen für die Problemlösung zusammengebracht wurden. Die OG hat einen geeigneten Rahmen für die Bearbeitung des Innovationsvorhabens geschaffen. Innerhalb der OG ergänzten sich die Kompetenzen der einzelnen Partner.

Die Hochschule Osnabrück brachte als wissenschaftliche Einrichtung ihre Kompetenzen rund um die Themenfelder der Feldrobotik, Navigation auf der einen Seite und Automatisierungstechnik, Energiemanagement und Energiewirtschaft zusammen. Das OG Mitglied Hof Fleming ist für den Aufbau, den Betrieb und die Durchführung von Versuchen mit den Teilkomponenten sowie dem gesamten System zuständig. Das OG Mitglied Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. vernetzt im Projekt die Wissenschaft mit der Praxis und unterstützt bei der Vorstellung des Trägerfahrzeugs und der Initiierung von Expertengesprächen für mögliche Einsatzbereiche.

In der Öffentlichkeitsarbeit war es von Vorteil, dass dieses Vorhaben ausgehend von einer realen landwirtschaftlichen Problemstellung heraus erläutert wurde. Als OG bestand ferner die Möglichkeit innerhalb des EIP-Verbundes sich untereinander auszutauschen. Die auf Landesebene organisierten Veranstaltungen brachten neue Lösungsansätze und sorgten für einen konstruktiven fachlichen Austausch untereinander. Auch der Austausch außerhalb des EIP-Netzwerkes wurde durch das Label OG vereinfacht.

2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen?

Eine nachfolgende Zusammenarbeit der OG-Mitglieder ist grundsätzlich vorgesehen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen sowohl wissenschaftlich wie auch wirtschaftliche Anwendung finden. Dazu werden

derzeit unter Berücksichtigung der konzeptionellen Ideen zur Skalierung Gespräche mit Unternehmen aus den Bereichen Bewässerungstechnik, Robotik aber auch Pflanzenschutzapplikation vorbereitet.

Ganz unabhängig davon ist auch die Kooperation in weiteren Forschungsvorhaben vorstellbar und auf verschiedenen Ebenen möglich. Dabei stehen agronomische Fragestellungen ebenso im Fokus wie die Themen Automatisierungstechnik und Robotik und erneuerbare Energieerzeugung.

Die Zusammenarbeit der OG Mitglieder von Hof Fleming und der Hochschule Osnabrück führte zu einem weiteren gemeinsamen Vorhaben im EIP-Projekt *Agri-PV Field Garden*. In diesem Vorhaben werden technischen Anlagen teilweise weiter eingesetzt. Darüber hinaus können die in *WaterWise* geknüpften Kommunikationskanäle auch bei der Durchführung zukünftiger Vorhaben nutzenbringend eingesetzt werden.

2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes

2.4.1 Zielerreichung

Die im Projektplan festgelegten Meilensteine wurden in wesentlichen Teilen erreicht.

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen alle Kernfunktion wie Wasser und Energie zu tanken, Kommunikation der Teilsysteme, Navigation und Ausbringung der gewünschten Wassermengen in einem automatischen Arbeitsprozess zu realisieren. Auch die Systemautarkie ist zu einem sehr hohen Grad gewährleistet.

Zudem sind die Praxisempfehlungen und Skalierungsmöglichkeiten in Form einer Konzeptstudie und einer Zusammenarbeit mit der LWK Niedersachsen abgehandelt worden.

Somit konnten, abgesehen der in Abschnitt 2.4.2 Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis genannten Abweichungen, alle geplanten Aspekte umgesetzt werden.

2.4.2 Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis

Auch in diesem Projekt kam es während des Verlaufes zu Komplikationen, die zu einigen Abweichungen vom ursprünglich geplanten Vorgehen geführt haben.

So kam es auf Grund verschiedenster Umstände zu **Verzögerungen**, die aber durch die kostenneutrale Verlängerung trotzdem aufgeholt werden konnten. Zu nennen sind hier unter anderem längere Entwicklungszeiten, Lieferverzögerungen und Corona bedingte Verzögerungen.

Im ursprünglichen Konzept wurde vorgesehen, dass auf zwei unterschiedlichen Standorten getestet wird. Dieser Ansatz wurde fallen gelassen.

Eine größere Abweichung auf technischer Seite betrifft **das initial aufgestellte Betankungskonzept**. Während die Betankung des Roboters per Schwerkraft mit einer Steuerung über ein motorisiertes Ventil erfolgen sollte, um den Energiebedarf für eine zusätzliche Pumpe einzusparen, hat sich im Betrieb gezeigt, dass das verwendete Ventil aufgrund der langen Schließ- und An-Zeiten nicht für eine dosierfähige Betankung geeignet ist. Da sich kein adäquates Ventil als Ersatz beschaffen ließ, wurde

für die Betankung eine Tauchpumpe in den Tank eingesetzt, mit der sich eine schnelle Betankung mit dosierbarer Wassermenge realisieren ließ.

Zudem wurde geplant, ein **induktives Ladesystem** mit einer **Übertragungsleistung**, die der Ladeleistung der mobilen Batterie von ca. 2,7 kW entspricht, zu erwerben. Als Kompromiss aus Kostenfaktor und Verfügbarkeit wurde ein induktives Ladesystem mit einer Ladeleistung von 1 kW erworben.

Über die Streifenbewässerung hinaus sollte auch eine pflanzenindividuelle **Wurzelbewässerung** ermöglicht werden. Dies würde über die Verstellung der Düsenposition erfolgen. So wäre es möglich kulturspezifisch nur die Bodenbereiche direkt über den durchwurzelten Zonen zu bewässern. Je nach Kultur wäre hier bspw. eine Schrägstellung der Düse nötig, um ausladendes Blattwerk zu umgehen. Nach Beendigung des Projektes stellt sich eine andere Situation dar. Während die Wassermenge sowohl über die Pumpenansteuerung als auch über die Fahrgeschwindigkeit regeln lässt, ist jedoch keine Verstellung der Düsenposition vorgesehen. Hier müsste eine Modifikation der Konstruktion des Bewässerungsapparates erfolgen. Die Verstellbarkeit der Düsenausrichtung ist jedoch im Umfang der Praxisempfehlungen enthalten.

2.4.3 Projektverlauf

Dieses Kapitel stellt den Gesamtverlauf des Projekts mit eingehender Betrachtung der durchgeführten Teilschritte sowie der erreichten Ergebnisse chronologisch dar. Die Gliederung orientiert sich dabei an den im Geschäftsplan geplanten Projektphasen sowie den zugehörigen Arbeitspaketen.

Konzeptphase 2/2021 – 7/2021

In der ersten Phase des Projektvorhabens erfolgte die Erarbeitung sowie die Gegenüberstellung unterschiedlicher Konzepte hinsichtlich der Funktionsweise sowie des Aufbaus der mobilen Bewässerungseinheit und der Versorgungsstation. Des Weiteren erfolgten Auslegungs- und Konstruktionsarbeiten zur Umsetzung der gewählten Konzepte. Für die Verifikation der initialen Dimensionierung der Energie- und Wasserspeicher sowie der energieverbrauchenden Einheiten wurde zudem ein Simulationsmodell erstellt, das historische Wetterdaten, wie Niederschlag und solare Strahlungsleistung berücksichtigt. Die für die Konzeptphase geplante Simulation verzögerte sich, bedingt durch eine verspätete Einstellung einer operativen Kraft, in die nachfolgende Projektphase.

Konzept der mobilen Bewässerungseinheit

Das modular aufgebaute Konzept der Bewässerungseinheit (siehe **Abbildung 2**) soll das Entwickeln sowie Testen der nötigen Algorithmik und Technologien ermöglichen. Der Schwerpunkt des Entwurfes lag dabei auf der schnellen und einfachen Austausch- sowie Erweiterbarkeit der benötigten Komponenten. Eine ggf. gewünschte Modifikation des Aufbaus soll ohne großen Aufwand von Zeit und Kosten möglich sein.

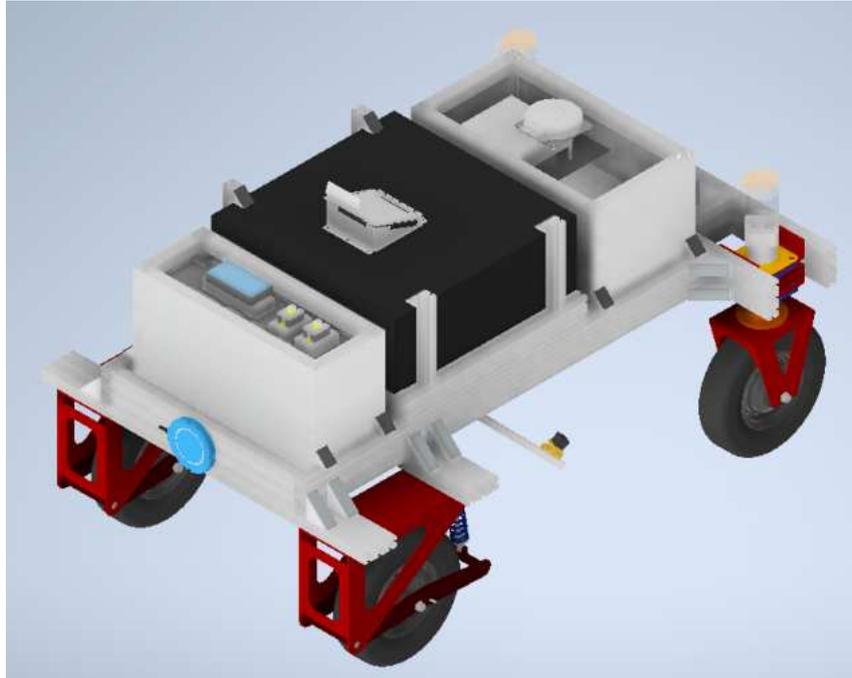


Abbildung 2: Konzept Bewässerungseinheit

Rahmen

Die mobile Bewässerungseinheit stellt sich als Roboter auf Basis einer Mischkonstruktion aus Aluminiumprofilen und Stahlteilen dar (siehe **Abbildung 3**). Diese Konstruktion bietet auf Grund der Vielzahl an Befestigungs- und Verstellmöglichkeiten eine optimale Ausgangssituation für eine modulare Bauweise des Gesamtsystems, welche mit geringen Kosten verbunden ist.

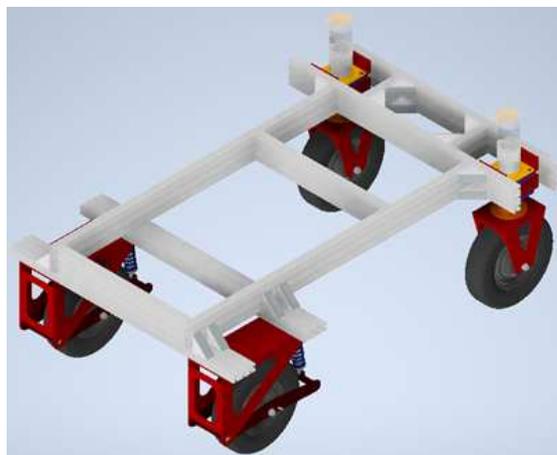


Abbildung 3: Konzept des Rahmens und Fahrwerkes

Antrieb und Lenkung

Die bereits erwähnten Stahlteile dienen in diesem Konzept als Teil des Fahrwerks bzw. der Radaufnahme und sind in **Abbildung 3** rot eingefärbt. Bei dem Aufbau des Antriebs inklusive der Lenkungsbaugruppe steht die Flexibilität der Konstruktionsparameter, wie Spurweite und Radstand im Vordergrund. Die Bauart der Grundkonstruktion ermöglicht es prozessadaptive Geometrieänderungen schnell und einfach vorzunehmen. So besteht die Aufnahme der Vorderachse (**Abbildung 3** Links Unten) aus zwei, quer zum Rahmen angebrachten Formprofilen. Dieser Aufbau lässt sich entlang des Rahmens verschieben um so Einfluss auf den Radstand zu nehmen. Zudem können die Radaufnahmen

entlang der Querstreben verschoben werden, was zu einer Änderung der Spurweite führt. Die Radaufnahmen der Vorderachse sehen zusätzlich den Einsatz einer Feder-/Dämpferbaugruppe vor, um durchgängigen Bodenkontakt zu gewährleisten. Der Aufbau der Hinterachse (**Abbildung 3** rechts oben) weicht in diesem Konzept vom Aufbau der Vorderachse ab. Hier ist keine Verschiebung in Längsrichtung und somit keine Einflussnahme auf den Radstand möglich. Anders sieht dies bei der Querposition und somit der Spurweite aus. Diese lässt sich ändern, um die korrekten Geometrieverhältnisse zwischen Vorder- und Hinterachse zu gewährleisten. Die Bewässerungseinheit ist primär als heckgelenkte Plattform vorgesehen. Realisiert wird dies durch den Einsatz von zwei unabhängig voneinander ansteuerbaren Lenkmotoren. Diese ermöglichen es die Ausrichtung der Hinterräder zu variieren, umso Kurvenfahrten durchzuführen. Da das Fahrzeug jedoch über einen Allradantrieb verfügen soll, muss zusätzlich zu der sogenannten Ackermannlenkung der Hinterachse auch eine Differentiallenkung der Vorderachse vorgesehen werden. Die Differentiallenkung sorgt für einen Geschwindigkeitsunterschied der beiden Vorderräder. So dreht das kurveninnere Rad langsamer als das äußere und das Fahrzeug kann ohne Änderung der Ausrichtung der Vorderräder eine Kurve fahren.

Bewässerungsapparat

Die Einheit ist mit einer Ausbringmenge von 100 l Wasser vorgesehen. Das Gesamtvolumen des Wassertanks wird daher mit 130 l etwas größer dimensioniert, um das Trockenlaufen der Pumpe zu verhindern sowie genügend Platz für Schwallwände zu bieten. Das geringe Tankvolumen erlaubt eine kompakte Bauweise der Bewässerungseinheit ohne dabei Einfluss auf den Umfang prozesswichtiger Technologien zu nehmen. Der in **Abbildung 4** dargestellte Bewässerungsapparat umfasst eine Einfüllvorrichtung, welche mittig auf der Oberseite des Tankes zu erkennen ist. Zudem eine Ausbringvorrichtung, welche sich an der Unterseite befindet. Der in Rot eingefärbte Tankdeckel wird aufgrund der umgebogenen Laschen beim Tankvorgang vom Betankungsarm geöffnet. Eine Federrückstellung gewährleistet nach erfolgreicher Betankung das Schließen. Die an der Unterseite zu erkennende Ausbringvorrichtung soll der pflanzennahen Ausbringung dienen.

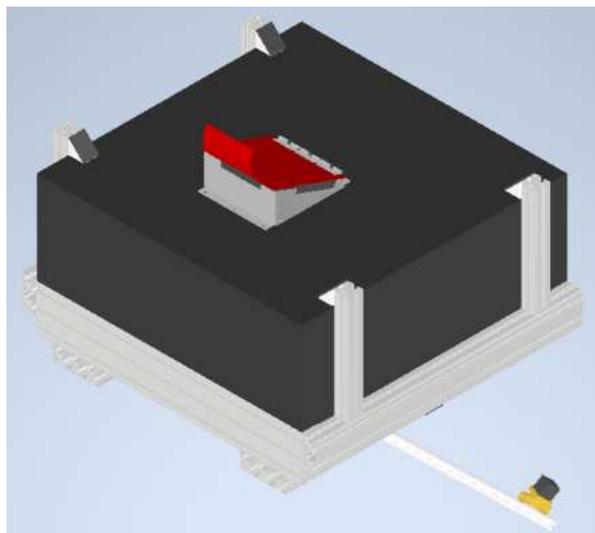


Abbildung 4: Konzept des Bewässerungsapparates

Elektronik

Die Aufgaben der Elektronik lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien unterteilen. Zum einen ist dies die Stromversorgung. Diese umfasst im Wesentlichen den Akku und das Ladesystem. Um den

späteren autonomen Betrieb zu gewährleisten, soll das Ladesystem durch ein induktives Ladegerät realisiert werden. Zweite Aufgabenkategorie dient der Steuerung der Roboter Komponenten wie z.B. Motoren und Pumpe sowie der Navigation und dem Managen des Arbeitsprozesses. Daher umfasst diese Komponente wohl die nötige Sensorik für die Navigation als auch die Steuerungstechnik der Bewässerungseinheit.

Konzept der Energie- und Wasserversorgung

Behausung

Bezüglich der Versorgungsstation hat sich die Verwendung einer Containerlösung etabliert. Der vorgesehene 20 Fuß ISO-Container dient als abschließbare Behausung für die Komponenten der Versorgungsstation sowie für die mobile Bewässerungseinheit während der Ladevorgänge und außerhalb der Bewässerungszeiten. Auf diese Weise wird stets ein Schutz vor Witterungseinwirkungen gewährleistet und ein unbefugter Zugang verhindert.

Energieversorgung

Im Zentrum des Konzepts der autarken Energieversorgung steht eine auf dem Dach der Ladestation installierten Photovoltaikanlage. Die PV-Module wandeln solare Energie in elektrische Energie um, welche durch einen Schaltschrank mit integriertem Wechselrichter, Maximum Power Point Tracking (MPPT)-Reglern und Akkumulatoren gesteuert und gespeichert wird. Die beteiligten Komponenten sind durch Sicherungen sowie Fehlerstromschutzschalter abgesichert. Das System ist so aufgebaut, dass ein Inselnetzbetrieb möglich ist. Auf diese Weise kann die Bewässerungseinheit unabhängig von einem externen Stromnetz operieren. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, ein externes Netz anzubinden, um bei Bedarf zusätzliche Energiequellen nutzen zu können. Die erhöhte Montage der PV-Anlage minimiert die Gefahr von Beschädigungen durch äußere Einflüsse und verringert die Wahrscheinlichkeit von Unfällen durch die auftretenden Spannungen. Der Schaltschrank ist durch einen Wanddurchbruch mit Kabelkupplungen mit der PV-Anlage verbunden. Auf diese Weise lässt sich die PV-Anlage schnell und unkompliziert von der Ladestation trennen, was die Mobilität und die Wartungsfreundlichkeit des Systems steigern. Die Energie wird der mobilen Bewässerungseinheit über eine induktive Ladestation zur Verfügung gestellt. Die induktive Ladetechnologie bietet gegenüber kontaktbehafteten Ladelösungen mehrere Vorteile: Sie ist verschleißfrei und schützt vor Berührung spannungsführender Leiter, wodurch die Sicherheit erhöht, und die Lebensdauer der Komponenten verlängert wird.

Wasserversorgung

Hinsichtlich des Betankungskonzepts wurde beschlossen den Grundwasseranschluss durch einen großen IBC-Container zu simulieren. Dieser wird während der Feldtests täglich befüllt, sodass die verfügbare Wassermenge für einen Bewässerungsbetrieb ausreicht. Das Konzept sieht vor, dass eine Gartenpumpe das simulierte Grundwasser über einen abgedichteten Wanddurchbruch mit einer lösbaren Kupplung in einen in der Ladestation befindlichen Zwischentank pumpt. Durch eine erhöhte Lagerung des Zwischentanks lässt sich die Schwerkraft nutzen, um die mobile Einheit zu betanken. Auf diese Weise lässt sich die Betankung zeitunkritisch gestalten, da die Betankung aus dem Zwischentank in Bruchteilen einer Minute erfolgen kann. Während die Bewässerung fortgeführt wird, hat die Station Zeit den Zwischentank wieder zu befüllen. Um die Gefahr eines Leerlaufs der Gartenpumpe zu verhindern, wurde ein Druckschalter vorgesehen, der im Fehlerfall den Pumpvorgang unterbricht und eine entsprechende Fehlermeldung initiiert.

Für das Betankungskonzept wurde ein Betankungsschlauch vorgesehen, der aus dem Zwischentank durch einen Wanddurchbruch nach außen führt. Außenseitig verläuft dieser durch einen an der

Containerwand montierten Betankungsarm. Um den Tankvorgang auszulösen, sieht das Konzept vor, dass die mobile Einheit mit einem Klappdeckel an den Betankungsarm heranfährt, die Öffnung mit Drehgebern registriert und ein entsprechendes Signal an eine Steuerung in der Versorgungsstation sendet, die folglich die Betankung initiiert. Um eine Variabilität bezüglich der Wassermenge herzustellen, wird mit dem Signal eine angeforderte Menge kommuniziert. Die Station überprüft während des Tankvorgangs mithilfe eines Sensors den Füllstand des Zwischentanks und stoppt die Betankung, sobald die angeforderte Menge entnommen wurde. Zur Sicherheit ist in dem Wassertank der mobilen Einheit ein Schwimmschalter vorgesehen, sodass bei Erreichen des Maximalfüllstands der Station ein Stoppbefehl kommuniziert wird. Für die Steuerung der Betankung wurde ein motorisiertes Ventil vorgesehen, das im ausgeschalteten Zustand den Wasserfluss automatisch unterbricht.

Steuerung

Für die Steuerung der Vorgänge in der Versorgungsstation wurde eine PC-basierte Steuerung verwendet, die mit einer analogen und digitalen Schnittstelle ausgestattet ist, über die Sensorwerte erfasst und Aktoren geschaltet werden können. Der Vorteil der PC-basierten Steuerung liegt zum einen in der Robustheit des Betriebssystems. Zum anderen wird über eine Internetverbindung ein Remotezugriff ermöglicht, wodurch das System gewartet und weiterentwickelt werden kann, ohne dass eine Person vor Ort sein muss. Darüber hinaus lassen sich auf diese Weise während des Betriebs Systemzustände und -werte aus der Ferne überwachen. Mit der Verwendung eines WLAN-Routers lassen sich weitere Geräte, wie IP-Kameras zur Überwachung des Versuchsfelds, an das Steuerungssystem koppeln. Die Möglichkeit des direkten Zugriffs auf die Entwicklungsumgebung erleichtert zudem eventuelle Anpassungen vor Ort. Für eine erleichterte Bedienbarkeit und die Möglichkeit die Systemzustände vor Ort schnell überblicken zu können, wurde beschlossen, ein kompaktes Panel-PC-System zu verwenden. Durch die Integration des Displays in der Schaltschranktür haben sowohl Anwender als auch Entwickler einen direkten Überblick über das System, ohne den Schaltschrank öffnen zu müssen oder zur Diagnose ihr eigenes Gerät anzuschließen.

Auslegung und Konstruktion der mobilen Bewässerungseinheit

Da sich die Roboterplattform als möglichst vielseitig darstellen sollte, wurde der Auslegung kein expliziter Betriebspunkt bzw. konkreter Arbeitsprozess zu Grunde gelegt. Durch die Vielzahl frei änderbarer Parameter beschränkte sich die Kernaufgabe der Auslegung in der Dimensionierung der Stromversorgung, Antriebstechnik und Bewässerungstechnik. Zudem muss eine Auswahl des Lokalisierungssystems und der Steuerungstechnik erfolgen. Das Verwenden von Aluminiumprofilen erlaubt das spätere Anpassen der genauen Dimensionen des Rahmens während der Aufbauphase. Daher wird auf eine explizite Größenvorgabe des Rahmens und Schaltschranks, welcher nun die gesamte Elektronik umfasst, verzichtet und auf die Aufbauphase verschoben.

Steuerungstechnik

Um die steuerungstechnischen Aufgaben möglichst effizient abarbeiten zu können, wurde der Ansatz eines einzelnen leistungsstarken Steuergerätes verfolgt, welches für den Großteil der Aufgaben zuständig ist. Dieses kann, falls nötig, durch kleinere aufgabenspezifische Mikroprozessoren ergänzt werden.

Aufgrund der hohen Anforderungen an das Hauptsteuergerät wurde hier auf, am Markt etablierte, nachahmte Technik zurückgegriffen. Im speziellen handelt es sich um eine „MicroAutoBox II“ (MAB) des Herstellers dSpace (dSpace, 2024). Die für Luftfahrt-, Raumfahrt- und Automobilindustrie zertifizierte Technik der MicroAutoBox stellt sich dank ihrer Robustheit ideal für den Einsatz im Feldversuchswesen dar. Dieses frei programmierbare Steuergerät bietet eine Vielzahl an Kommunikationsschnittstellen in Kombination mit einer leistungsstarken Recheneinheit, welche

explizit für Rapid-Control-Prototyping (RCP)-Anwendungen entwickelt wurde. Zusätzlich zum Hauptsteuergerät wurden ein Wifi-Router für die Kommunikation zwischen Roboter und Station, sowie ein weiterer Mikrocontroller zur Systemverwaltung während des Standby-Betriebes angeschafft.

Lokalisierungssystem

Aufgrund des hohen Anspruchs an die Präzision der Navigation wurde sich im Falle des Lokalisierungskonzeptes für eine Satelliten gestützte Positionsbestimmung mit Real-Time Kinematics (RTK) Korrektur entschieden. Da in diesem Projekt ein hoher Autarkiegrad angestrebt wird, sollen die benötigten RTK-Daten nicht über externe Anbieter bezogen werden. Als Alternative wird eine selbst eingerichtete Referenzstation verwendet.

Auf Grundlage dieser Anforderungen wurde das „Multi-Sensor RTK/PPP Module“ in Kombination mit einer Referenzstation des Herstellers ANavS zur Positionsbestimmung vorgesehen (ANavS, 2024). Bei diesem Produkt handelt es sich um eine Sensorkombination aus einem GNSS-Empfänger und einer inertialen Messeinheit (IMU). Eine solche Kombination sorgt mittels Sensorfusion zu einer deutlichen Steigerung der Zuverlässigkeit und Präzision der Positionsdaten. Zudem bietet die IMU den Vorteil der kurzzeitigen Lokalisierung ohne GNSS-Empfang, wie es z.B. während der Fahrt in den Container der Fall ist.

Antriebstechnik

Wie **Abbildung 2** bzw. **Abbildung 3** zu entnehmen ist, wurde sich bereits in der Konzeptphase für den Einsatz von Narbenmotoren bezüglich des Fahrtriebes des Roboters entschieden. Diese bieten den Vorteil der radinternen Umwandlung von elektrischer in Rotationsenergie. So entfallen notwendige Übersetzungen, welche insbesondere im Falle der gelenkten Hinterachse zu einem deutlich komplexeren und somit auch deutlich kostenintensiveren Aufbau führen würde. Zusätzlich zum Fahrtrieb lässt sich **Abbildung 2** bzw. **Abbildung 3** auch die Umsetzung der Hinterradlenkung entnehmen. Diese erfolgt mittels zweier Schrittmotoren, welche das Winkelverstellen der Hinterräder realisieren sollen.

Im Falle des Fahrtriebes wird jedes Rad mit einem „8“ 48V DC Brushless HUB motor“ des Herstellers Quinder ausgestattet. Dieser ist mit einem empfohlenen Dauerbetriebsdrehmoment von ~ 35 Nm und einem maximalen Drehmoment von 85 Nm angegeben, was sich für die zu erwartenden Lasten als ausreichend darstellt. Da diese Motoren direkt für den Agrarbereich ausgelegt wurden verfügen sie über die nötige Robustheit gegen äußere Einflüsse wie Wasser und Staub. Zudem lassen sie sich direkt mit selbstreinigenden Profilreifen konfigurieren, was die Einsatzfähigkeit im Gelände deutlich steigert.

Die Lenkung der Hinterachse übernehmen zwei „AS8918“ Schrittmotoren der Firma Nanotec. Ebenso wie die Narbenmotoren, verfügen auch diese über die nötigen Schutzmaßnahmen vor Umwelteinflüssen. Die Motorausrichtung lässt sich mit einer Schrittweite von $1,8^\circ$ ausreichend genau verstellen.

Angesteuert werden alle Motoren über einen eigenen Motorcontroller. Verwendet wird hier der „N5“ Motorcontroller der Firma Nanotec. Dieser verfügt über eine Vielzahl an Kommunikationsschnittstellen, was eine optimale Integration in das Gesamtsystem erleichtert.

Bewässerung

Da die Tankgröße mit 130 l bereits in der Konzeptphase feststand, betraf die Auslegung des Bewässerungssystems in erster Linie, die Auswahl einer passenden Pumpeneinheit. Die Kerneigenschaft sollte hier die Verstellbarkeit des Volumenstroms sein. Auf diese Weise ist man bei der Variation der Ausbringung nicht allein auf die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit angewiesen.

Dies hat neben der Vergrößerung des Variationsbereichs der Ausbringungsmenge auch fahrdynamische Vorteile.

Auf Basis dieser Vorgabe fiel die Wahl auf die „UP14-P“ 24 V Universalpumpe der Firma Marco. Diese selbstansaugende Pumpe verfügt über einen maximalen Volumenstrom von 46 l/min. Bei einer Ausbringungsgeschwindigkeit von 0,4 m/s, einer Annahme der Bewässerungsbreite von 0,15 m sowie eines Reihenabstandes von 1 m entspricht dies einem Flächenbewässerungsäquivalent von $\sim 13,5 \text{ l/m}^2$. Durch eine Anpassung der Arbeitsgeschwindigkeit lässt sich die Ausbringungsmenge weiter steigern. Die Ansteuerung der Pumpe erfolgt über einen externen PWM-Controller, welcher zusammen mit einem Volumenstromsensor der Firma IFM zur Regelung der Ausbringungsmenge dient.

Energieversorgung

Zur Abschätzung der benötigten Akkukapazität wurde sich zunächst an bestehenden Roboterkonzepten orientiert. So wurden unter anderem die Modelle Xaver (Fendt, 2020), Oz (Naio, 2024) und BoniRob (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2008) als Referenzen verwendet, um eine beispielhafte Prognose eines Arbeitsprozesses zu ermöglichen. Daraus ergab sich eine Akkukapazität von $\sim 2,5 \text{ kWh}$. Aufgrund der Vielzahl an unbekanntem Parametern des Prozesses, wurde sich hier jedoch für ein Sicherheitsfaktor von 2 entschieden, was die gewünschte Gesamtkapazität auf $\sim 5 \text{ kWh}$ anhebt.

Das, von der Firma EcoVolta bezogene, „evoTractionBattery | 48/5“ Energieversorgungssystem, umfasst, neben einem 5 kWh großen Akku mit 48 V Nennspannung, eine direkte CAN-Bus-Schnittstelle zum Auslesen und Steuern der aktuellen Betriebsparameter des Systems. So lassen sich die Prozessphasen des Ladens und Entladens effizient managen. Zudem wird der Aufbau um einen weiteren 12 V Blei-Gel-Akku erweitert, um das Abschalten des Energieversorgungssystems während der Ruhephasen zu ermöglichen.

Auslegung und Konstruktion der Versorgungsstation

Energieversorgung

Die elektrische Energie, die die Station täglich zur Verfügung stellen muss, setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf der mobilen Bewässerungseinheit sowie der Energie für Verbraucher wie Aktoren, Sensoren und Steuerung, die in der Station eingesetzt werden. Anhand von überschlägigen Rechnungen wurde der Energiebedarf des Roboters für einen Bewässerungszyklus initial zu 2,5 kWh abgeschätzt und mit einem Sicherheitsfaktor zu 5 kWh beaufschlagt. Es wurde angenommen, dass eine Gesamtkapazität des Energiespeichers von 10 kWh ausreicht, um den weiteren Einsatz der Verbraucher innerhalb der Station sowie einen zusätzlichen Mehrverbrauch durch die Anwesenheit von Forschungsmitarbeitern decken zu können.

Für die Dimensionierung der Photovoltaikanlage war das primäre Ziel die Dachfläche des Containers möglichst auszunutzen, um dem Energiebedarf des Demonstrators gerecht werden zu können. Im Zuge dessen erfolgte eine Marktanalyse sowie die Konstruktion einer entsprechenden Aufständerung mit den Abmessungen ausgewählter Solarmodule. Ein Trade-Off zwischen der Wirtschaftlichkeit und der Energiedichte ergab eine Konfiguration von 12 Modulen á 400 W Peakleistung. Für die Orientierung der Anlage wurde eine Ost-/West-Ausrichtung mit einer für die Ausrichtung geeigneten Modulneigung von 14° gewählt. Hierbei ist die Selbstreinigung der Module möglich und mit der flacheren Neigung werden höhere Windlasten vermieden. Die Konstruktion der Aufständerung geschah in Kooperation mit einem Ingenieurbüro, das einen statischen Nachweises für die PV-Anlage erbracht hat. **Abbildung 5** stellt die konstruierte Aufständerung der PV-Anlage auf dem Dach des Containers dar.

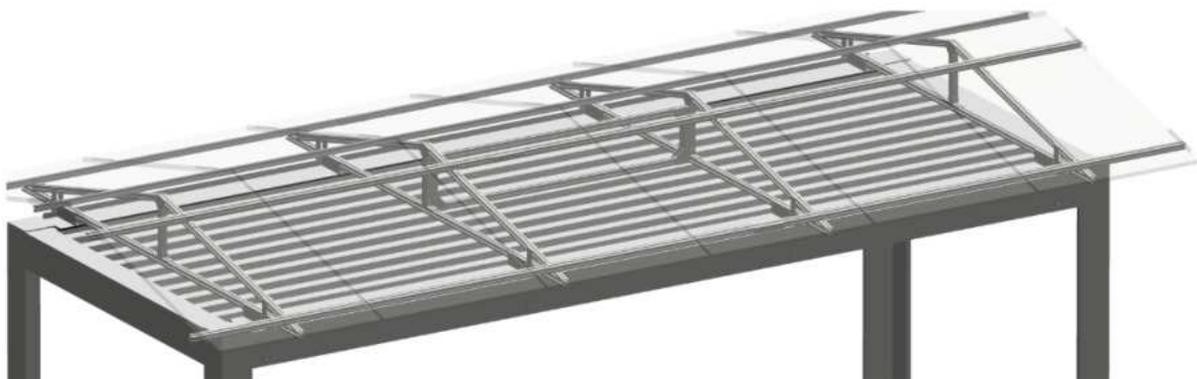


Abbildung 5: Rahmenkonstruktion für die Aufständerung der PV-Anlage

Ein Performance Test der Anlagenkonfiguration mit der Sonnenkonfiguration des Raums Osnabrück mit dem Tool „Photovoltaic Geographical Information System“ von der europäischen Kommission ergab folgende Energieerzeugungswerte für die Monate, in denen die Feldtests durchgeführt werden:

	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
Mtl.	558,62 kWh	581,58 kWh	583,2 kWh	484,49 kWh	346,1 kWh	204,89 kWh
Tägl. Ø	18,02 kWh	19,39 kWh	18,81 kWh	15,63 kWh	11,54 kWh	6,61 kWh

Tabelle 1 Mit PVGIS errechnete PV-Erträge bei der gewählten Anlagenkonfiguration

Es ist zu erkennen, dass die Anlage im Mai, Juni und Juli im Durchschnitt an jedem Tag die benötigte Energiemenge beinahe zweimal produzieren könnte. Im August und September wird die produzierte Energiemenge geringer, dennoch wird im Durchschnitt der Energiebedarf täglich gedeckt. Im Oktober, gegen Ende der Bewässerungssaison, wird im Durchschnitt nicht die volle angedachte Energiemenge

produziert. Es wird jedoch angenommen, dass zu dieser Zeit aufgrund der Regenperiode und des fortgeschrittenen Wachstumsstadiums der Pflanzen weniger bewässert wird und der Energiebedarf an dieser Stelle daher zurückgeht.

Für die Verschaltung der Anlage wurde eine String-Topologie gewählt, die mit Schutzkleinspannung betrieben wird. Dies erhöht die Sicherheit und bietet eine einfachere Wartbarkeit am PV-System. Die 12 Module sind zu vier 3 x 40V Strings verschaltet, sodass eine Maximalspannung von 120V je String auftritt. Für die Regelung des Batterieladevorgangs sowie eine verbesserte Effizienz durch Maximum-Power-Point-Tracking (MPPT) wurden der Modulleistung entsprechende MPPT-Regler der Marke Victron Energy ausgewählt. Anhang A – Schematische Darstellung des konzipierten Energiesystems zeigt die entsprechende Verschaltung sowie weitere Systemkomponenten anhand der Topologie des Energieversorgungssystems. Die MPPT-Regler der vier PV-Strings speisen zusammen die erzeugte Energie über die 48V DC-Ebene in einen Akku-Rack, bestehend aus vier parallel geschalteten 2,4 kWh Pylontech Akkus. Über dieselbe Spannungsebene werden zudem diverse Netzteile versorgt, die die benötigten Spannungen für die Steuerung, Relais sowie Sensoren bereitstellen.

Für den gegebenen Anwendungsfall wurde ein Wechselrichter mit einer Nennleistung von 3 kW gewählt. Für eine verbesserte Kompatibilität und die Möglichkeit den Energiefluss durch ein Energiemanagementsystem steuern zu können, wurde darauf Wert gelegt, dass Victron-Systeme verwendet werden. Der gewählte Victron MultiPlus II-Wechselrichter erzeugt ausgehend von der Batteriespannung eine 230 V Wechselspannung zur Versorgung der AC-Verbraucher, wie Pumpe, Ventil, WLAN-Router, Roboterladesystem sowie externe Geräte, die von den Forschungsmitarbeitern genutzt werden. Gleichzeitig erlaubt er die geforderte optionale Einbindung eines externen Stromnetzes. Das Victron CCGX Energiemanagementsystem kommuniziert mit den beteiligten Energiesystemkomponenten und sorgt für einen effizienten Energiefluss. Darüber hinaus bietet es eine Kommunikationsschnittstelle zur Einbindung aller Systemwerte in die Software der Stationssteuerung.

Für das induktive Laden wurde ein Ladesystem der Firma Delta Energy Systems ausgewählt. Das System ist für eine Übertragungsleistung von 1 kW ausgelegt. Mit dieser Leistung wird die mögliche Ladeleistung des Roboters von 2,5 kW zwar nicht vollständig ausgereizt, aber der Funktionsnachweis kann damit abgebildet werden. Es war kein anderes System ausfindig zu machen, was für die Anwendung besser geeignet ist. Bei dem ausgewählten System wird die Energie zum Laden der mobilen Einheit über den Wechselrichter bereitgestellt. Ein stationsseitiges Ladepad überträgt die Energie auf das roboterseitige Pad, das mit einem Ladegerät ausgestattet ist. Über die vorhandene CAN-Schnittstelle kann die Robotersteuerung den Ladevorgang selbst initiieren, sobald der Andockvorgang erfolgt ist.

Wasserversorgung

Für die Wasserversorgung während der Feldtests wurde die Verwendung eines 1000L IBC-Tanks zur Simulation des Grundwasseranschlusses genutzt. Dieser wird nach Bedarf regelmäßig aufgefüllt. Eine Pumpe mit einer Nennleistung von 1 kW sowie einer Fördermenge von 3300 L/h befüllt daraus den in der Ladestation befindlichen Zwischentank. Hierfür wurde ein 300L IBC-Tank vorgesehen. Des Weiteren erfolgte die Konstruktion eines Gestells für die erhöhte Lagerung des Zwischentanks sowie des Betankungsarms. **Abbildung 6** stellt die entsprechenden Designs dar. Da der aus Stahl zu fertigende Betankungsarm in der hauptsächlich aus PUR-Schaum bestehenden Wand der Ladestation nicht befestigt werden kann, wurde auf der Innenseite des Containers eine Halterung vorgesehen, die eine Montagemöglichkeit bietet und für eine Kraftverteilung auf eine ausreichende Fläche sorgt. Die Montage des Betankungsarms erfolgt anhand von M15 Schrauben und Muttern sowie PVC gefertigten Distanzhülsen. An dem Betankungsarm wurde ein höhenverstellbares Kontaktstück vorgesehen, das eine Justierung zur Anpassung an die Höhe des Tankdeckels der mobilen Einheit ermöglicht. Im rechten

Bildteil ist das Gestell für den Zwischentank zu sehen. Dieses ist so konstruiert, dass der IBC-Tank mit seiner PE-Palette aufgesetzt und mit Schellen fixiert werden kann. Die Montage des Gestells erfolgt im Containerboden anhand von M8-Schrauben und Schwerlastdübeln.

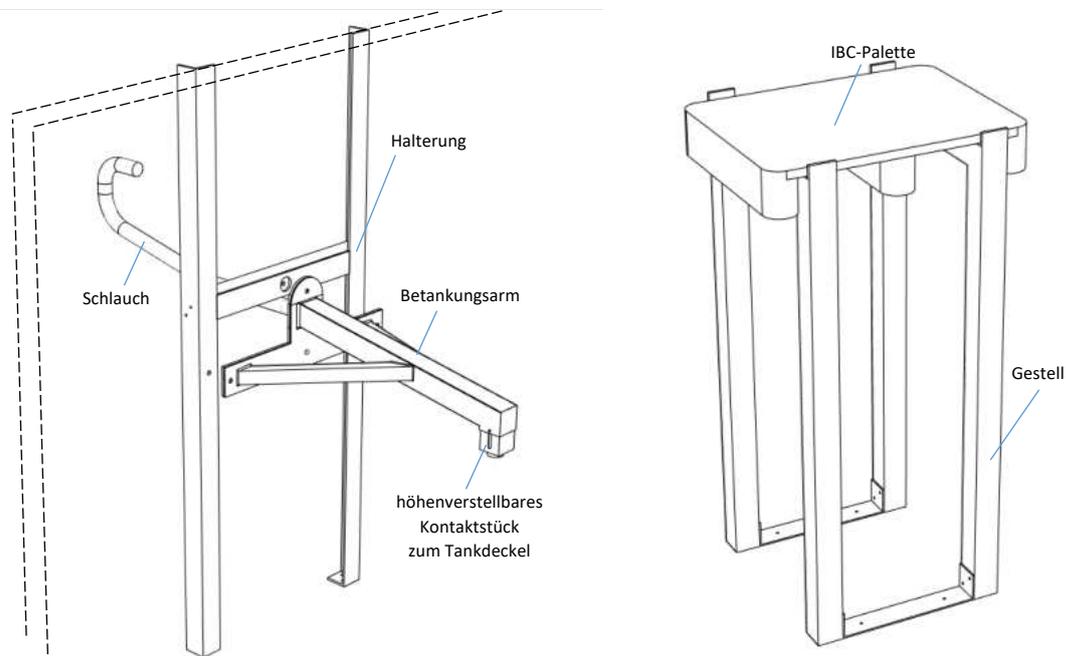


Abbildung 6: Konstruktion Betankungsarm (links) und Gestell für den Zwischentank (rechts)

Erstellung des Simulationsmodells „Lokale Smart Grid Station“

Um das Einsparpotenzial von Energie und Ressourcen im Vergleich zu herkömmlichen Systemen analysieren und die Amortisationszeiträume sowie wirtschaftlich vorteilhafte Bedingungen ermitteln zu können, wurde ein zeitdiskretes Simulationsmodell der "Lokalen Smart Grid Station" entwickelt. Zur Erstellung dieses Modells wurde die Simulationssoftware MATLAB Simulink von Mathworks verwendet. Das Modell besteht aus modularen Systembausteinen, die als Quellen, Speicher oder Verbraucher fungieren und zusammen das Gesamtsystem der Versorgungsstation darstellen. Eine zentrale Einheit vernetzt diese Bausteine und reguliert den Energie- und Ressourcenfluss zwischen ihnen.

Ein Photovoltaik-Modell dient als zentrale Energiequelle und berechnet die Anlagenleistung für jeden Zeitschritt der Simulation, basierend auf Sonnendaten aus einer Look-Up-Tabelle und der gegebenen Anlagenkonfiguration. Diese Leistung wird dem Steuerbaustein zugeführt, der dann je nach Vorgaben und Situation entscheidet, ob die Energie der stationären Batterie oder der Fahrzeugbatterie zugeführt wird. Ein Teil dieser Energie wird durch ein tageszeitenabhängiges Lastprofil verbraucht, das sowohl den konstanten Energiebedarf der Anlagenkomponenten als auch den geschätzten Verbrauch der vor Ort arbeitenden Forschungsmitarbeiter berücksichtigt.

Das Entladen des mobilen Akkus hängt ebenfalls von einem zeitabhängigen Lastprofil und den Niederschlagsdaten ab. Wenn die tägliche Niederschlagssumme unter einem festgelegten Schwellenwert liegt, wird kein Wasser ausgefahren und die Batterie bleibt ungenutzt. Die Energiemenge, die zwischen den Bausteinen übertragen wird, berücksichtigt stets die Wirkungsgrade der jeweiligen Komponenten. Eine schematische Darstellung des Simulationsmodells findet sich in **Abbildung 7**.

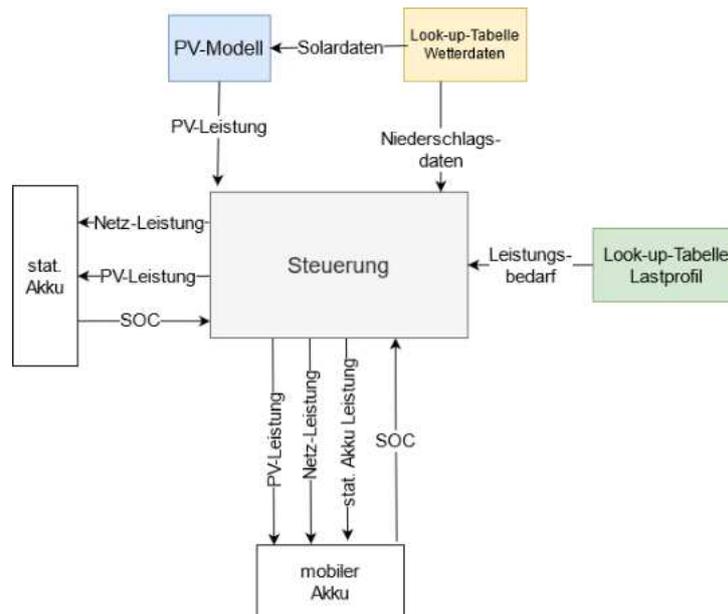


Abbildung 7: Schematischer Überblick über das Simulationsmodell "Lokale Smart Grid Station"

Aufbauphase 8/2021 – 7/2022

In der Aufbauphase erfolgte, aufbauend auf dem Konzept, die Bestellung und Fertigung der benötigten Komponenten und Materialien sowie der Aufbau der konzipierten Systeme. Bedingt durch die langen Lieferzeiten einiger Komponenten sowie durch die verzögerte MitarbeiterEinstellung in der vorigen Projektphase wurde die Aufbauphase um drei Monate ausgedehnt. In dieser Zeit konnten bereits Funktionstests auf dem Campus der Hochschule Osnabrück erfolgen. Zum Ende der Aufbauphase erfolgte der Umzug sowie der Aufbau der Station auf dem Hof Fleming. Parallel zum Aufbauprozess wurde für die Verifikation der Auslegung des Energiesystems ein saisonaler Betrieb anhand von Wetterdaten mit dem in der Konzeptphase entwickelten Systemmodell simuliert. Weiterhin wurde im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit eine Webseite für das Projekt erstellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Aufbauphase in die Arbeitspakete gegliedert aufgeschlüsselt.

Simulation eines saisonalen Betriebs

Simuliert wurde mit den Niederschlags- und Sonneneinstrahlungsdaten aus den Jahren 2021, 2020, 2019, 2018, 2015 und 2010 mit dem Standort Osnabrück, um Einflüsse von besonders regnerischen oder besonders düren Jahren zu untersuchen. **Tabelle 2** gibt einen Rückschluss auf die allgemeinen Unterschiede der Wettercharakteristik der simulierten Jahre. Es wird dabei ausschließlich der Ausbringungszeitraum zwischen Mai und September betrachtet.

Jahr	Regenmenge in [l/m ²]	Regentage (>= 2,5 L/(m ² d))	Solare Energie diffus in [kWh/m ²]	Solare Energie direkt in [kWh/m ²]	Solare Energie Summe in [kWh/m ²]	Durchschnittstemperatur [°C]
2021	246,4	26	319,29	444,08	763,37	16,52
2020	182,23	23	326,49	473,82	800,31	16,76
2019	144,1	20	324,23	487,86	812,09	17,14
2018	149,27	16	335,31	532,86	868,17	18,36
2015	179	18	322,11	446,07	768,18	16,14
2010	283,6	33	325,53	462,15	787,68	15,86

Tabelle 2: Wettercharakteristik der simulierten Jahre

Für die Bewässerung der Pflanzen wurde im Projekt als Randbedingung für die benötigte Menge Wasser je Quadratmeter ein Wert von 5 L/m² angenommen. Da der Stromverbrauch des Roboters während des Bewässerungsvorgangs aufgrund von fehlenden Randbedingungen nicht modellierbar war, wurde in der Simulation zunächst angenommen, dass der Roboter für den gesamten Ausbringungsvorgang bei 5 L/m² Wasserbedarf eine Energiemenge von 2,5 kWh verbraucht. Hierbei handelt es sich um einen überschlägigen Wert. Regnet es über den Tag weniger als 5 L/m², so bringt der Roboter im Modell die Differenz dazu zusätzlich aus und nicht zusätzlich 5 L/m². Dementsprechend seltener muss der Roboter zurückfahren und dementsprechend weniger Energie verbraucht er dabei in einem Bewässerungsdurchgang.

Die Simulation mit den Wetterdaten beinhaltet die Randbedingungen des realen Aufbaus, wie er nach einer überschlägigen Dimensionierung der Energiekomponenten geplant wurde. Folgende Tabelle fasst die wesentlichen Randbedingungen zusammen:

PV-Anlagenleistung	4,8 kWp	Temperaturkoeffizient PV	-0,34 %/K
Anlagenausrichtung	Süd-West 14° Neigung	Wirkungsgrad Wechselrichter	95%
Wirkungsgrad MPPT	98%	Wirkungsgrad der Akkus	98%
Ladeleistung Akku stat.	4,8 kW	Ladeleistung Akku mobil	1 kW
Kapazität Akku stat.	8,8 kWh	Kapazität Akku mobil	2,5 kWh
Entladeleistung Akku stat.	5,3 kW	Selbstentladung Akkus	3% pro Monat
Schwellenwert Bewässerung	2,5 L/(m ² d)	Energie für das Befüllen des Wassertanks pro Bewässerungstag	1,5 kWh

Tabelle 3: Randbedingungen der Simulation

Als Lastprofil für den elektrischen Verbrauch der Ladestation wurde pauschal ein konstanter Leistungsbedarf von 200 Watt angenommen, der sich auf den Eigenverbräuchen aller Komponenten zusammensetzt. Weiterhin wurde ein zusätzlicher Leistungsbedarf von durchschnittlich 500W während der Arbeitszeiten abgeschätzt. Dieser setzt sich zusammen aus dem Leistungsbedarf für Licht, Ladegeräte, Maschinen etc. und wirkt wochentags zwischen 10 und 14 Uhr (angenommene Arbeitszeit der Forschungsmitarbeiter).

Tabelle 4 stellt die Simulationsergebnisse für die jeweiligen simulierten Jahre anhand der ausgelegten Anlagenkonfiguration dar. Dargestellt sind die Energien die erzeugt und verbraucht wurden sowie ungenutzte Energien oder Energien, die aus dem Netz bezogen werden mussten. Es ist zu erkennen, dass eine Energiemenge von nahezu 50% der erzeugten PV-Energie nicht genutzt wird. Währenddessen müssen jeweils nur wenige kWh im betrachteten Zeitraum der jeweiligen Jahre vom Netz bezogen werden. Dabei sind es einzelne Tage, an denen bewässert werden muss, in vergangener Zeit jedoch zu wenig Sonnenenergie vorhanden war, um den Speicher ausreichend zu laden. **Abbildung 8** veranschaulicht diesen Effekt anhand der bilanzierten Energien an Tagen, an denen zu wenig PV-

Energie produziert wurde und ein entsprechender Netzbezug vonnöten war. Hierbei handelt es sich um einen Ausschnitt aus dem Jahr 2021. Der Verlauf beginnt an dieser Stelle am 26. August.

Jahr	Erzeugte PV-Energie in kWh	Ungenutztes Potential der PV-Anlage in kWh	Genutztes Potential der PV-Anlage in kWh	Energie, die aus dem Netz bezogen werden musste in kWh	Vom Roboter verbrauchte Energie in kWh
2021	3393	1745	1648	1,6	362
2020	3558	1892	1466	2,9	377,9
2019	3602	1914	1688	1,9	388,5
2018	3841	2148	1693	2,8	388,5
2015	3413	1736	1677	3,2	380,6
2010	3484	1856	1628	6,7	351,3

Tabelle 4: Simulationsergebnisse mit den ausgelegten Energiekomponenten

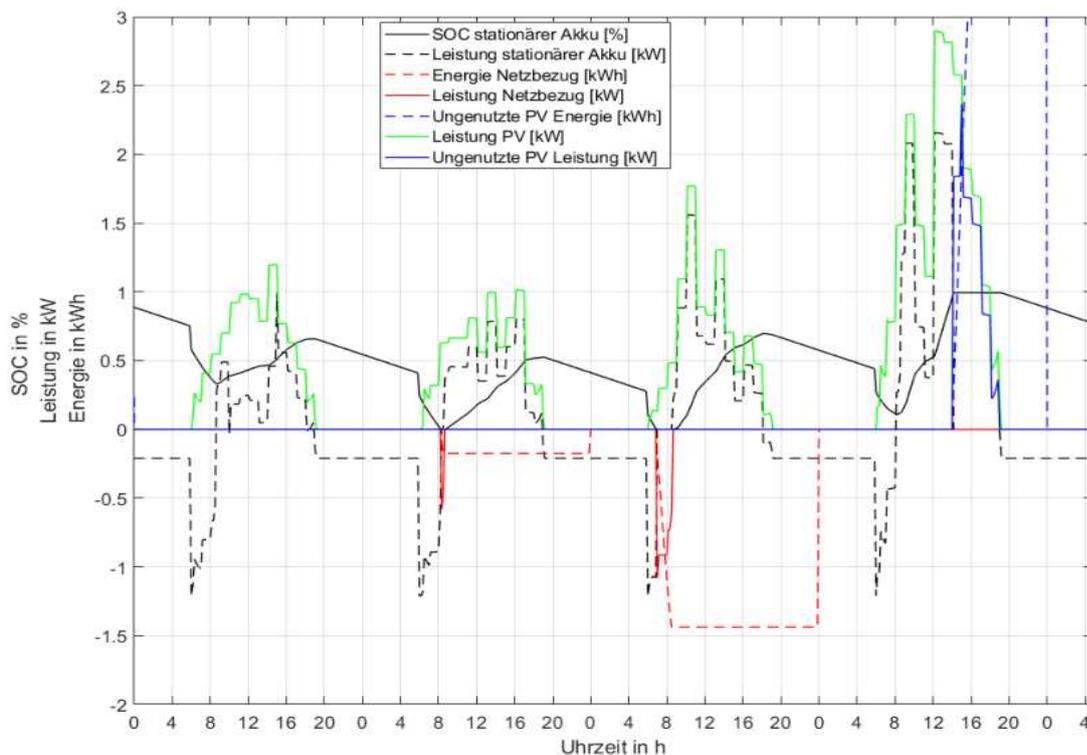


Abbildung 8: Darstellung der Energiebilanzierung an Tagen mit Netzbezug

Es ist zu erkennen, dass der Speicher am ersten Tag nicht wieder vollständig geladen wurde, da die erzeugte solare Energie nicht ausgereicht hat. Entsprechend entlädt sich der Speicher weiterhin im darauffolgenden sonnenarmen Tag und es wird kurzzeitig ein Netzbezug benötigt. Die Menge solarer Energie reicht an diesem Tag aus, um den Speicher zur Hälfte zu laden. Diese Energie wird in der folgenden Nacht während des Bewässerungsvorgangs vollständig verbraucht und es wird wieder ein Netzbezug nötig. Am darauffolgenden Tag ist genug Sonnenenergie vorhanden, um den Speicher so weit zu laden, dass in der darauffolgenden Nacht kein Netzbezug nötig ist.

Äquivalent verhalten sich die anderen Jahre. Die Wettercharakteristik eines Jahres hat keine nennenswerte Auswirkung auf dieses Verhalten. Es ist die Anzahl der aufeinanderfolgenden Tage mit geringer Sonneneinstrahlung bei gleichzeitigem Mangel an Regen entscheidend. Demgegenüber steht jedoch ein gewisser Spielraum bei der Bewässerung, insbesondere dadurch, dass die Transpiration bei geringer Sonneneinstrahlung zurückgeht und somit der Wasserbedarf. Entsprechend fällt auch der Energiebedarf geringer aus. Es gilt zu beachten, dass aufgrund fehlender Randbedingungen, wie dem Verbrauch des Roboters oder des tatsächlichen Wasserbedarfs der Versuchsflächen pauschale Annahmen anhand von überschlägigen Rechnungen getroffen werden mussten. Konkrete Aussagen über die tatsächlichen Bedingungen können erst nach erfolgten Feldtests getroffen werden und erst auf Basis der Auswertungsergebnisse kann eine Skalierungsempfehlung sowie eine Entwicklung von Praxishinweisen erfolgen. Siehe hierzu Kapitel „Entwicklung von Praxishinweisen“.

Aufbau und Inbetriebnahme der mobilen Bewässerungseinheit

Im Aufbau der mobilen Bewässerungseinheit erfolgte die finale Zusammensetzung der in der Auslegungsphase bestimmten Komponenten zu der in der Konzeptphase entwickelten Gesamtlösung.

Rahmen, Fahrwerk, Antrieb und Lenkung

Die auf **Abbildung 9** dokumentiert fertiggestellte Rahmenkonstruktion kommt auf eine Gesamtgröße von Länge 1755 mm x Breite 1200 mm x Höhe 660 mm. Diese besteht größtenteils aus 120 x 40 mm Aluminiumprofilen in Kombination mit den benötigten Schweißbaugruppen für Fahrwerk und Lenkung, welche aus 5 mm starkem Stahlblech gefertigt sind.



Abbildung 9: Finaler Rahmen und Fahrwerk (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Bewässerungsapparat

Bezüglich des Tankmoduls (siehe **Abbildung 10**) sind im Vergleich zum Konzept einige Änderungen und Ergänzungen vorgenommen worden. Die größte Änderung betrifft die Ausführung der Bewässerungsvorrichtung. Während in der Konzeptphase eine bodennahe Ausbringung vorgesehen war, ist nun eine selbstkonstruierte Fächerdüse verbaut worden. Diese ist an der Unterseite des Roboters befestigt und erzeugt bei der Ausbringung einen Wasservorhang. So wird ein effizienter kollisionsfreier Arbeitsprozess gewährleistet. Zudem wurden neben der Pumpe und dem Durchflusssensor auch ein Öffnungswinkelsensor am Tankdeckel, sowie zwei Füllstandssensoren an der Unter- und Oberseite des Tanks angebracht. Der obere der beiden Sensoren signalisiert das der Tank maximal gefüllt ist, was insbesondere für den Tankvorgang eine wichtige Information ist. Der untere Sensor signalisiert analog dazu einen leeren Tank, was eine wichtige Information für die

Pumpensteuerung ist. Um die Pumpe nicht trockenlaufen zu lassen verbleibt bei Signalisierung eines leeren Füllstandes eine kleine Restmenge Wasser im Tank.

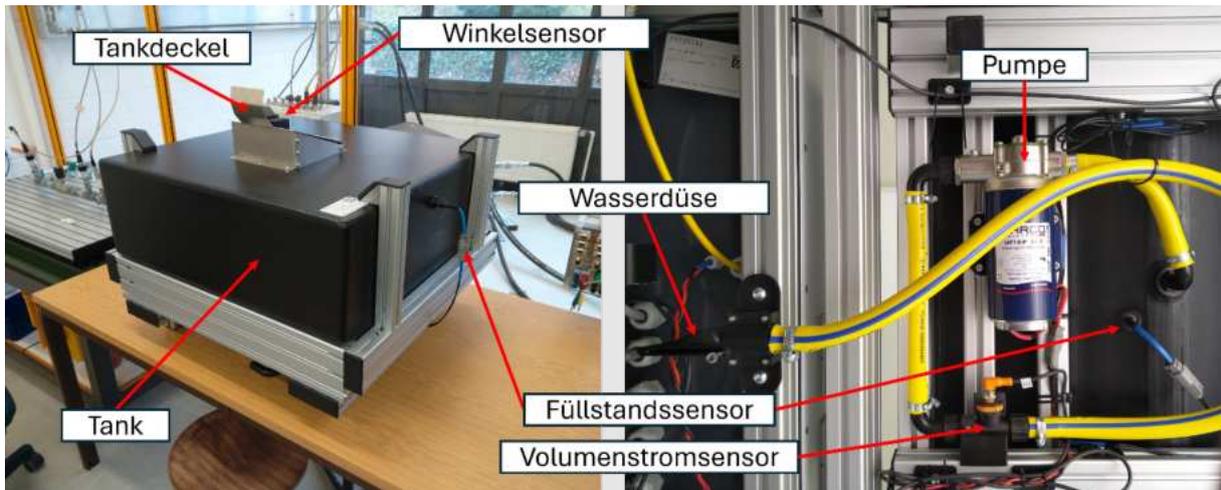


Abbildung 10: Finales Tankmodul (links: Oberseite, rechts: Unterseite)

Elektronikmodul

Das letzte der drei Hauptmodule umfasst die gesamte Elektronik zur Verwaltung der Bewässerungseinheit. Hierzu gehören neben den bereits erwähnten Komponenten der Steuerung, der Lokalisation sowie des Wasser- und Energiemanagements auch die nötigen Bauteile zur Verbindung der Einzelsysteme. Zudem sind weitere Komponenten zur Gewährleistung der Betriebsfähigkeit des Gesamtsystems verbaut worden. So enthält das auf **Abbildung 11** dokumentierte finale Elektronikmodul ein Relaismodul, welches zu An- und Abschaltung einzelner Komponenten dient. Des Weiteren wurde die Einheit sowohl mit einer Heizung als auch einer Kühlung (siehe **Abbildung 12**) ausgestattet. Eine Übersicht der Netzwerktopologie ist dem Anhang auf **Seite 82** zu entnehmen.

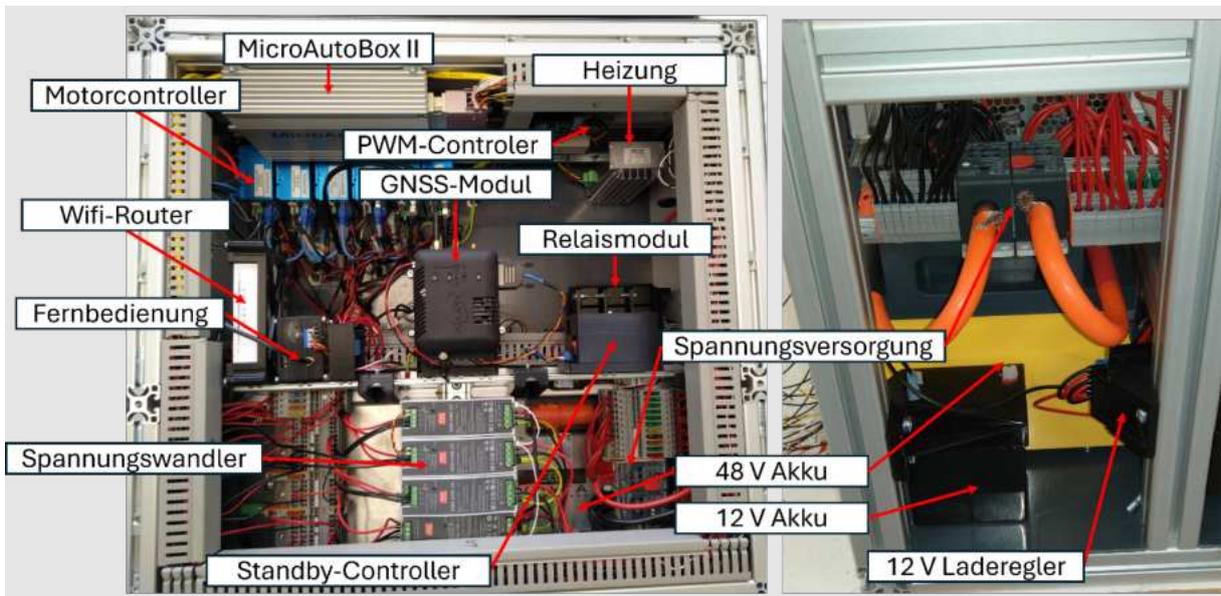


Abbildung 11: Finales Elektronikmodul (links: Oberseite, rechts: Rechtseite)

Die für die Bedienung wichtigen Schnittstellen sind in **Abbildung 12** zu erkennen. Diese umfassen neben den Antennen für die Fernsteuerung und der Wifi-Kommunikation auch die Schalter zur Aktivierung verschiedener Betriebskomponenten, sowie die Anschlüsse eines

230 VAC Netzladegerätes. Da das induktive Ladesystem nicht rechtzeitig geliefert wurde, ist das Netzladegerät zu diesem Zeitpunkt die einzige Ladeschnittstelle.

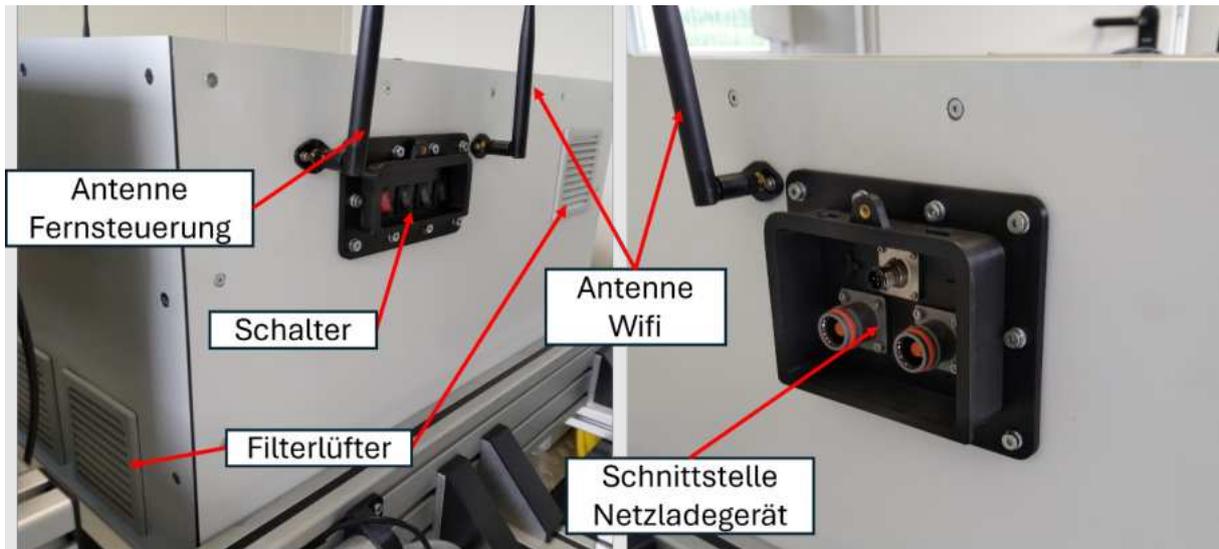


Abbildung 12: Schnittstellen des Elektronikmoduls
(links: Fahrtrichtung rechts, rechts: Fahrtrichtung links)

Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des in **Abbildung 13** dokumentierten Gesamtsystems erfolgt zunächst durch Überprüfung der Grundfunktionen des Fahrverhalten, der Wasserförderung und der Lokalisation auf dem Gelände der Hochschule.



Abbildung 13: Roboter zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

Kernfokus lag hierbei auf der korrekten Umsetzung der vorgesehenen 4 Grundmodi. Der Erste dieser Modi ist ausschließlich für das Bespielen des MAB vorgesehen und wird daher nicht weiter beschrieben. Die restlichen drei Zustände stellen sich wie in **Abbildung 14** dar.

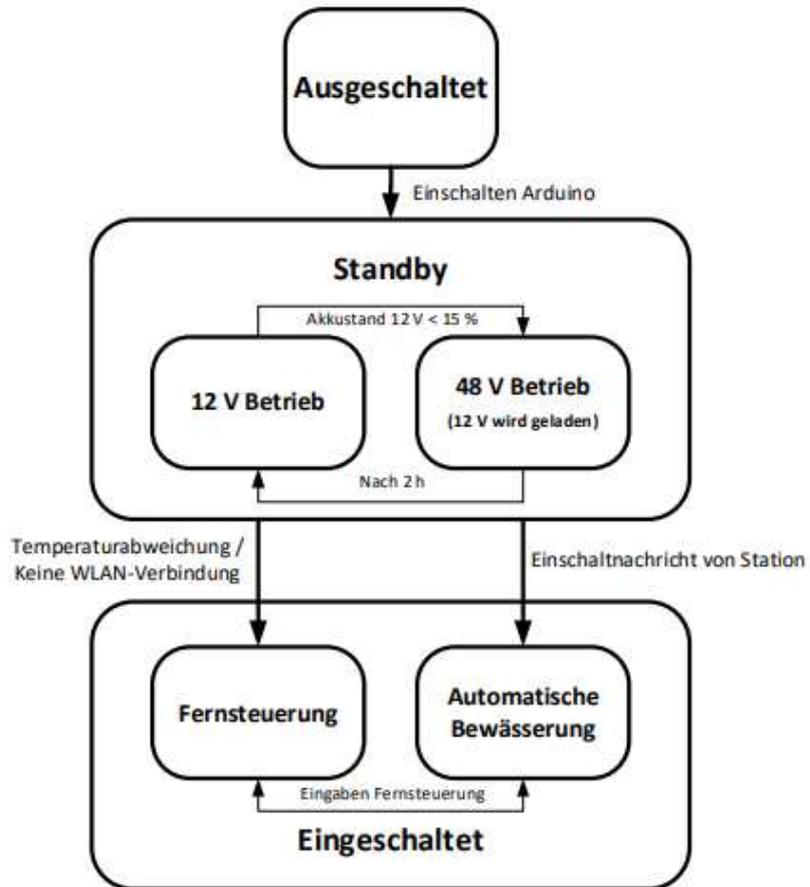


Abbildung 14: Zustandsdiagramm der Hauptzustände des Roboters

Zunächst kann die Bewässerungseinheit komplett ausgeschaltet sein, sodass eine Interaktion über WLAN von der Station nicht möglich ist. Um die Kommunikation mit der Station aufzubauen, muss der Standby-Controller manuell eingeschaltet werden. Der Standby-Controller wird über den 12 V Akku mit Spannung versorgt und ermöglicht so einen Standbybetrieb. In diesem Modi minimiert der Roboter seinen Energieverbrauch. Eine zu geringe Spannung und somit ein zu geringer Ladezustand des 12 V Akkus schalten den 48 V Akku ein. Da dieser über den 48 V Akku geladen wird, wird so eine Tiefenentladung vermieden. Der Standby-Betrieb wird dabei nicht verlassen.

Ein Umschalten vom Standby in den eingeschalteten Betrieb erfolgt durch verschiedene Ereignisse. Zum einen kann eine zu hohe oder zu niedrige gemessene Temperatur im Modul, das Einschalten des Roboters triggern, um anschließend die Heizung oder Lüftung im Modul zu aktivieren. Neben dieser Maßnahme zum Bauteilschutz wird der Roboter zudem eingeschaltet, wenn der Standby-Controller keinen Zugang zum WLAN-Netzwerk aufbauen kann. Dieser Vorgang dient dazu zu Transport- und Testzwecken den Roboter anschließend per Fernsteuerung bedienen zu können.

Im Regelbetrieb soll ein Einschalten über eine Nachricht der Versorgungsstation ausgelöst werden. Dies geht dann damit einher, dass der Roboter einen Bewässerungsvorgang automatisiert ausführt. Im eingeschalteten Zustand bildet die MAB das zentrale Steuergerät. Der Roboter soll später wahlweise selbstständig anhand der Positionsinformationen des GNSS-Systems und eines zuvor definierten Feldes fahren können oder per Fernbedienung gesteuert werden.

In beiden Fällen berechnet die MAB die benötigten Raddrehzahlen und Lenkwinkel. Diese gibt die MAB an die Motorcontroller weiter. Darüber hinaus regelt die MAB anhand des gemessenen Volumenstroms des Wassers über den PWM-Controller die Universalpumpe. Weiter schaltet die MAB

die Heizungen und Lüfter nach Bedarf ein und wieder aus. Im automatisierten Modus soll der Roboter in Zukunft die einzelnen Reihen des Feldes abfahren. Die Wassermenge soll dabei über eine einprogrammierte Karte vorgegeben werden können. Den Kurs, den der Roboter abfährt, generiert die MAB dann aus einer Wassermengenkarte, welche im späteren Betrieb ebenfalls einprogrammiert werden soll.

Aufbau und Inbetriebnahme der Versorgungsstation

Die Ergebnisse des Aufbaus der Versorgungsstation lassen sich in die Hauptaspekte Energieversorgung, Wasserversorgung sowie Steuerung unterteilen und werden an dieser Stelle in der genannten Reihenfolge vorgestellt.

Energieversorgung

Zu Beginn der Aufbauphase erfolgte der Aufbau des Schaltschranks und die Montage sowie die Verschaltung der darin befindlichen Systemkomponenten der Versorgungsstation. **Abbildung 15** stellt diese aus verschiedenen Ansichten dar. Im linken Bildteil ist die obere Montageplatte des Schaltschranks zu sehen, auf der die MPPT-Regler der vier Modulstrings sowie der Wechselrichter Platz finden. Diese sind gemäß der Systemskizze in Anhang A mit dem im mittleren Bildteil dargestellten Akku-Rack verschaltet. Die Verwendung von Klemmenleisten, Kabelkanälen sowie Kabelröhren sorgt dabei für ein wartungsfreundliches, sicheres und übersichtliches Kabelmanagement. Die Leitungen sind dabei anhand von entsprechenden Sicherungen und FI-Schutzschaltern abgesichert. Im rechten Bildteil ist die Rückseite der Schaltschranktür dargestellt, an der die Steuerung, das Energiemanagementsystem sowie ein Notausschalter, ein Quittierungsschalter und ein Einschalter für das Steuerungssystem montiert sind. Auf diese Weise stehen dem Anwender alle wichtigen Funktionen zur Steuerung und Überwachung des Systems sowie zur Sicherheitsabschaltung auf der Vorderseite des Schaltschranks in kompakter Anordnung zur Verfügung.



Abbildung 15: Energiesystem – Umrichter (links) – Energiespeicher (mitte) – Steuerung (rechts)

Über den an der RS232-Schnittstelle angeschlossenen Analog-/Digital-Wandler (ADC) bezieht die Steuerung Sensorwerte und steuert die Pumpe sowie das Betankungsventil über entsprechende Relais an. Neben den Relais sind Netzteile angebracht, die die Relais sowie Sensoren mit den benötigten DC-Spannungen versorgen.

Zur Sicherstellung einer flexiblen Portabilität der Versorgungsstation wurde der Schaltschrank in der Ladestation gesichert. Hierzu wurden mit Schwerlastdübeln im Boden Ankerpunkte gesetzt und der Schaltschrank an diesen fixiert. Um auch Seitenkräfte und Momente aufnehmen zu können, wurde an der Containerwand analog zum eingangs beschriebenen Montagekonzept des Betankungsarms eine Verbindung zum oberen Teil des

Schaltschrank geschaffen. Die Durchführung sämtlicher Kabel in den Schaltschrank erfolgt durch eine Öffnung in der Sockelblende im unteren Teil des Schaltschrank. Hierzu gehören Sensorkabel, Versorgungskabel des Ventils, Netzkabel zum WLAN-Router sowie Anschlusskabel für die PV-Strings. Für die Grundwasserpumpe ist eine Schuko-Steckdose am Schaltschrank montiert, die vom Relais geschaltet wird.

Die Verbindung der PV-Kabel an den Schaltschrank sowie der Internetanschluss erfolgen über einen abgedichteten Wanddurchbruch. Anhand von Schraubkupplungen sind die Verbindungen direkt lösbar. Darüber hinaus ist eine Kupplung für die Datenleitung sowie die Spannungsversorgung der Außenkamera vorhanden. Die Signalleitung für die Antenne der RTK-Station zur Koordination der mobilen Bewässerungseinheit ist über eine Kabelverschraubung nach außen geführt. Um das WLAN-Signal für die mobile Einheit zu verstärken sind die WLAN-Antennen des Routers ebenfalls außen angebracht. Die Verlängerung erfolgte mit entsprechender Koaxialkabel.

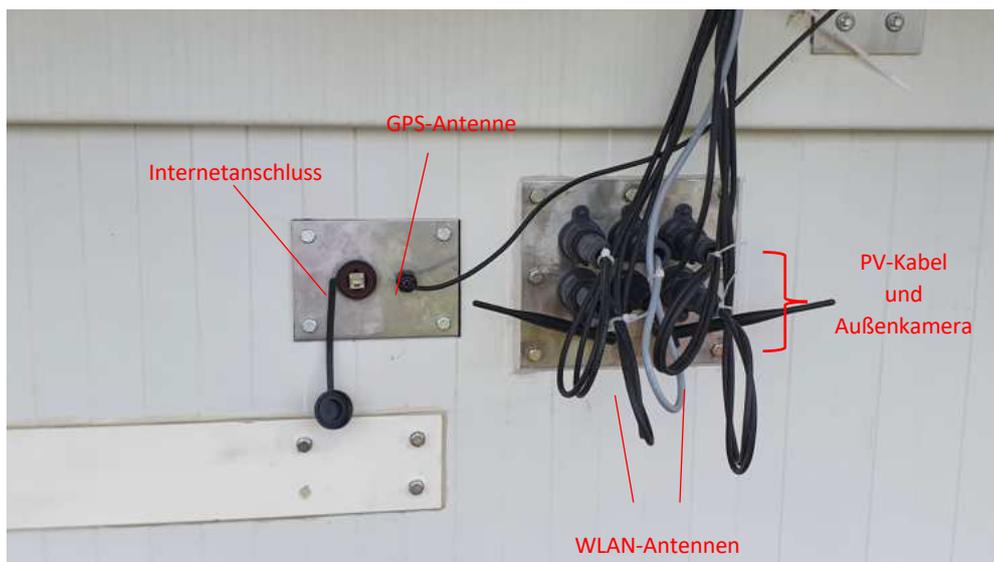


Abbildung 16: Wanddurchbruch für die Kabel

In der Aufbauphase wurden die Materialien der konzipierten PV-Aufständerung in der Betriebswerkstatt gefertigt und vor dem Umzug der Station zum Versuchsbetrieb wurde die PV-Anlage auf dem Hochschulcampus probeweise aufgebaut, in Betrieb genommen und erfolgreich getestet. **Abbildung 17** stellt die aufgebaute PV-Aufständerung dar. Diese besteht im Wesentlichen aus den vier Dreieckselementen sowie vier Pfetten, die sie verbinden und auf denen die Montage der Module erfolgt. Die Fixierung der Aufständerung erfolgt mit einer Verschraubung der Dreieckselemente an den Seiten des Containers. Durch ihre Bauweise müssen bei der Demontage für den Umzug nur wenige Verbindungen gelöst werden, was sich positiv auf die Portabilität der Station auswirkt. Demzufolge ließ sich die Anlage noch am Umzugstag aufbauen und in Betrieb nehmen. **Abbildung 18** stellt die Aufbauarbeiten sowie den montierten Zustand der PV-Anlage dar.



Abbildung 17: PV-Aufständerung im montierten Zustand



Abbildung 18: Montierte PV-Anlage auf der Ladestation



Abbildung 19: Aufbauarbeiten am Umzugstag

Wasserversorgung

Für die Wasserentnahmeschnittstelle wurde der konstruierte Betankungsarm aus Stahl gefertigt und für die Sicherstellung der Witterungsbeständigkeit feuerverzinkt. Der Aufbau erfolgte zeitnah nach dem Umzug der Anlage aufs Versuchsgelände. **Abbildung 20** stellt die Wasserentnahmeschnittstelle dar. Im linken Bildteil ist der außen am Container montierte Betankungsarm sowie die mobile Einheit, die daran andockt, dargestellt. Im rechten Bildteil sind die Montageprofile der Halterung des Betankungsarms sowie der aufgestellte Zwischentank zu sehen. Am Entnahmehahn des Tanks ist das motorisierte Ventil angeschraubt. Der daran angeschlossene Wasserschlauch wird durch einen Wanddurchbruch in den Betankungsarm geführt.

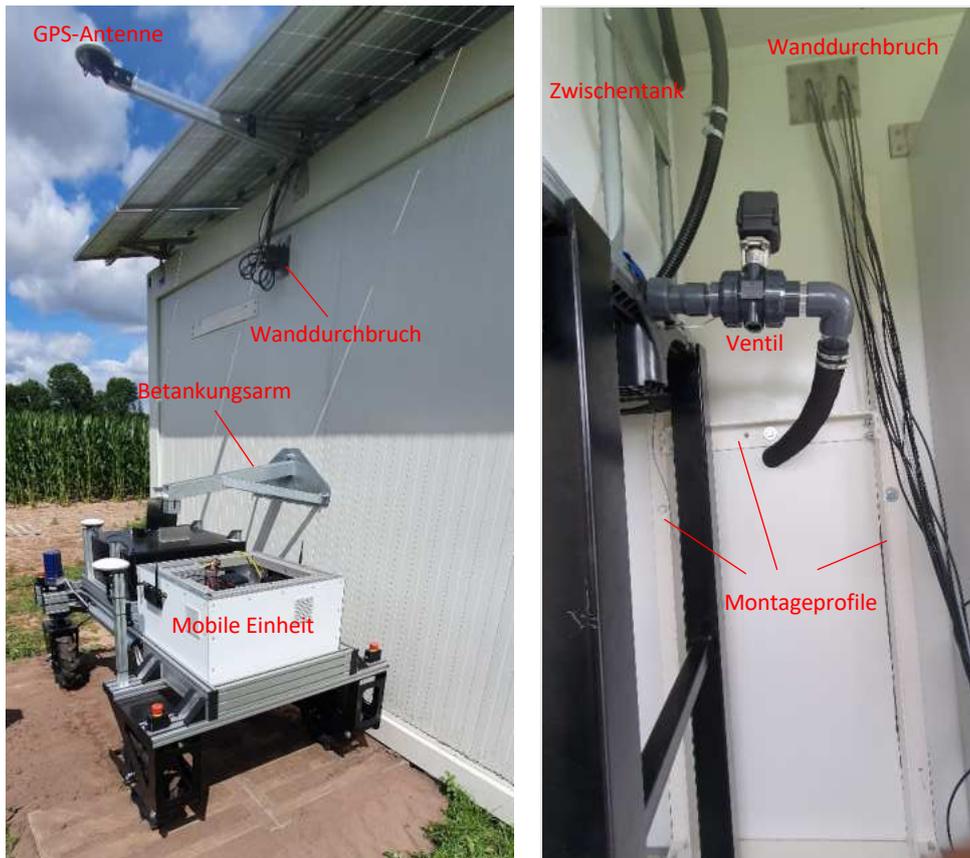


Abbildung 20: Wasserentnahmeschnittstelle - außen (links) - innen (rechts)

Für das Befüllen des Zwischentanks aus dem außen gelegenen Grundwassertank sorgt die unter dem Zwischentank fixierte Grundwasserpumpe. **Abbildung 21** stellt ihre Lage dar. Anstatt des initial vorgesehenen Druckschalters wurde ein Durchflusssensor an den Druckanschluss der Pumpe montiert, um die geförderte Wassermenge durch die Steuerung überwachen zu lassen und auf diese Weise ein Trockenlaufen der Pumpe erkennen und verhindern zu können. Zur Erfassung des Füllstands im Zwischentank wurde eine kapazitive Messsonde eingelassen, die abhängig vom Füllstand ein analoges Signal generiert.

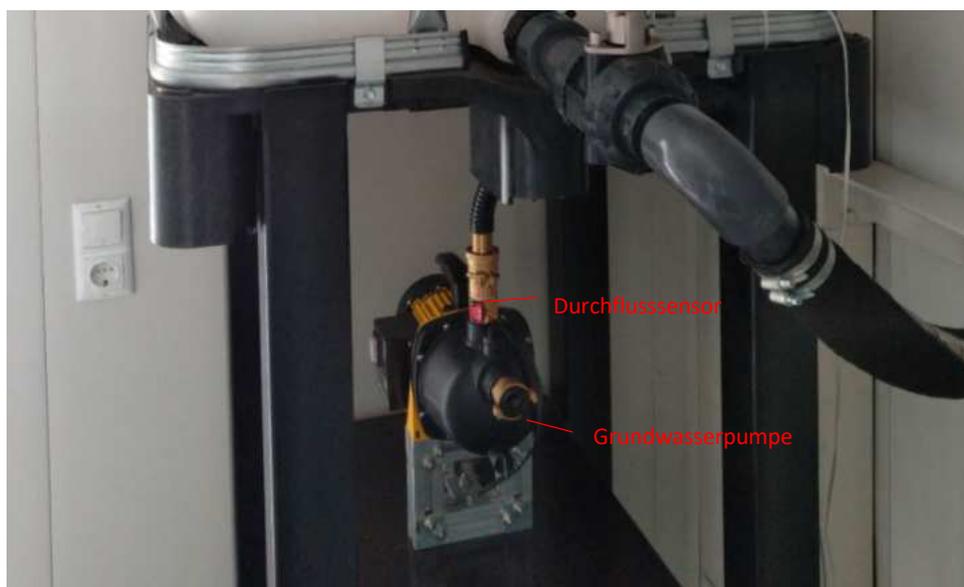


Abbildung 21: Grundwasserpumpe

Steuerung

In der Aufbauphase wurde auf dem Panel-PC für die anstehende erste Feldversuchphase eine erste rudimentäre Steuerungsversion mit LABView NXG implementiert. Diese umfasst eine Modbus-TCP-Kommunikation der Steuerung mit dem Energiemanagementsystem zur Erfassung von Systemwerten und -zuständen der Energieanlage, eine UART-Kommunikation mit dem ADC zur Ansteuerung der Aktoren-Relais und zur Erfassung der Sensorwerte sowie je eine Zustandsmaschine für das automatisierte Befüllen des Zwischentanks und eine manuell gesteuerte Betankung der mobilen Bewässerungseinheit. Die Entwicklung einer automatisierten Betankung sollte an dieser Stelle im Rahmen der ersten Feldversuche erfolgen.

Öffentlichkeitsarbeit

Als Beitrag zur Öffentlichkeitsarbeit wurde das Projekt in die Forschungsdatenbank der Hochschule Osnabrück eingetragen und eine Webseite erstellt, die interessierte Agrarwirte und Forschende über das Projekt informiert (<https://www.hs-osnabrueck.de/waterwise-asba/>). **Abbildung 22** zeigt einen Ausschnitt der Webseite. Die Hauptansicht vermittelt dem Leser eine Motivation zur Durchführung des Forschungsprojekts sowie eine Vision zur Lösung der zugrundeliegenden Problemstellung. In weiteren Ansichten wird das Konzept des Demonstrator-Systems thematisiert, das Projektkonsortium vorgestellt und auf die Kontakte verwiesen.



Abbildung 22: Ausschnitt aus der Projekt-Webseite

Seit 2024 wird das Projekt *WaterWise* zusätzlich zur Website der Hochschule Osnabrück auch auf der Website des Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e. V. (NAN) präsentiert. Dies dient dazu, den Wissenstransfer in die landwirtschaftliche Praxis weiter zu intensivieren ([Water Wise - Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. / Ackerbauzentrum \(netzwerk-ackerbau.de\)](https://www.waterwise-netzwerk-ackerbau-niedersachsen.de/)).

Feldtest I 7/2022–10/2022 – Ergebnisdiskussion 11/2022 – Systemoptimierung 12/2022-03/2023

Nachdem die Funktionsfähigkeit der Versorgungsstation und der Bewässerungseinheit als Einzelsysteme an der Hochschule überprüft wurde, folgte die erste Feldtestphase auf dem Testgelände von Hof Fleming. Hier sollten zunächst die Grundfunktionen samt der dazugehörigen Kommunikation validiert werden. Die im Testbetrieb gewonnen Erkenntnisse über Defizite des Gesamtsystems dienen der späteren Optimierungsphase als Grundlage zur Verbesserung der Systemkompatibilität.

Feldversuchswesen

Das Versuchswesen der ersten Testphase beschränkte sich im Wesentlichen auf die Darstellbarkeit der Einzelphasen eines Arbeitszyklus. Wichtig hierbei ist die funktionierende Kommunikation zwischen den beiden Teilsystemen sowie die Auslegung der nötigen Regelschleifen.

Kommunikation

Die Verständigung der beiden Teilsysteme erfolgt über eine Wifi Verbindung, welche über die beiden verbauten Wifi Router ermöglicht wird. Der Informationsaustausch erfolgt dabei über das User Datagram Protocol (UDP).

Dieses simple Kommunikationsprotokoll bietet eine ausreichende Sicherheit der korrekten Informationsübertragung. Der Vorteil dieses Verständigungsstandards ist sein simpler Aufbau und im Zuge dessen eine schnelle Datenübertragung.

Ein Beispiel des Nachrichteninhalts ist etwa der Tankbefehl des Roboters an den Container zum Start der Betankung. Unter anderem werden auch die Positionsdaten und Betriebszustände des Roboters an den Container übermittelt, um diese in der Grafische Benutzeroberfläche (GUI) der Versorgungsstation darstellen zu können.

Der vorgesehene Kommunikationsumfang konnte im Laufe der Versuchsphase auf seine Funktionsfähigkeit getestet und validiert werden.

Betankung

Eine der Kernaufgaben, die es im Rahmen dieses Projektes zu lösen galt, war der Betankungsvorgang der mobilen Bewässerungseinheit. Das Tanken erfolgt während der in **Abbildung 23** dargestellten Durchfahrt des Roboters unterhalb der Tankvorrichtung.



Abbildung 23: Durchfahrt Betankungsvorgang (links: Anfahrt, mitte: Tankposition, rechts: Abfahrt)

Der Ablauf eines Betankungsvorgangs stellt sich wie folgt dar. Zunächst wird während der Anfahrt der Tankdeckel durch Kontakt mit der Tankvorrichtung (**Abbildung 23**, links) mechanisch geöffnet. Der verbaute Winkelsensor am Drehpunkt des Tankdeckels erfasst dabei den Öffnungswinkel des Tankdeckels. Dieser Winkel dient dem Detektieren der Position der Einheit unterhalb der Tankvorrichtung. Bei Erreichen der Tankposition (**Abbildung 23**, Mitte) gibt der Roboter den Tankbefehl an den Container, welcher anschließend mit der Wasserförderung beginnt. Nach Förderung der gewünschten Menge oder Erreichen des maximalen Füllstandes der Bewässerungseinheit wird die Förderung beendet. Der Roboter wartet nach Beendigung weitere 8 s auf den Nachlauf der in der Containerleitung befindlichen Restmenge, um anschließend seine Fahrt fortzusetzen. Der Tankdeckel wird während der Abfahrt maximal geöffnet (**Abbildung 23**, rechts) und schließt sich aufgrund der Federrückstellung automatisch nach verlieren des Kontaktes zur Tankvorrichtung.

Navigation

Um einen autonomen Arbeitsprozess abbilden zu können muss die Bewässerungseinheit in der Lage sein einem definierten Pfad zu folgen. Aus diesem Grund ist die Entwicklung und Implementierung eines Fahrspurregler notwendig, um die gewünschte Betriebsweise abbilden zu können. Das Konzept der Spurführung lässt sich **Abbildung 24** entnehmen.

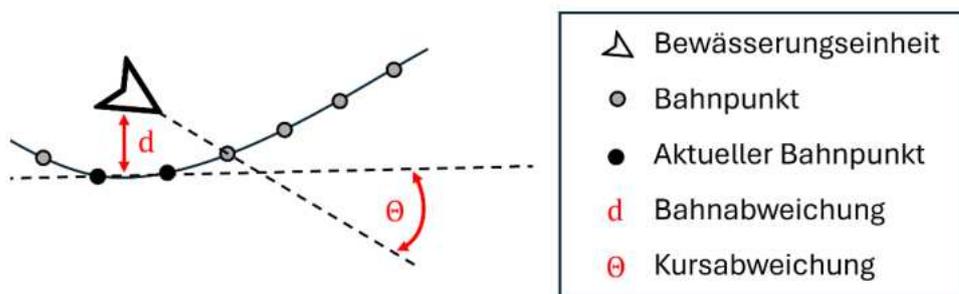


Abbildung 24: Fahrspurregler

Zu erkennen sind hier die beiden Größen Kurs- und Bahnabweichen, welche genutzt werden, um der Bewässerungseinheit das Folgen des Pfades zu ermöglichen. Ein Pfad besteht aus einer Vielzahl an Bahnpunkten, welche mit der jeweiligen Geschwindigkeit und dem idealen Lenkeinschlag versehen sind. Diese Bahnpunkte werden zwischen zwei Navigationsposen wie z.B. Feldanfang und Feldende generiert. Die Bewässerungseinheit betrachtet nun den nächstgelegenen Bahnpunkt. Durch Bestimmen einer Geraden durch diesen und den folgenden Bahnpunkt lässt sich der minimale Abstand der Position, als Bahnabweichung, und der abweichende Winkel der Ausrichtung, als Kursabweichung, bestimmen. Durch reglerbasierte Minimierung dieser beiden Parameter ist es dem Roboter möglich dem Pfad zu folgen.

Teil dieser Versuchsphase war es die Regelung aufzubauen, korrekt zu kalibrieren und zu validieren.

Defekt des Akkus

Aufgrund eines Defektes des Energieversorgungssystems des Roboters musste die Versuchsphase am Hof Fleming frühzeitig beendet werden. Der Roboter wurde für die restlichen Tests und Optimierungen dieser Phase wieder zurück zur Hochschule gebracht.

Optimierungen an der mobilen Bewässerungseinheit

Reparatur des Akkus

Der defekte Akku wurde reklamiert und seitens des Herstellers instandgesetzt. Nach Zurückerhalt des Energieversorgungssystems wurde dieses wieder eingebaut und in Betrieb genommen.

Lenkungskalibrierung

Eine der wichtigsten Optimierungen der Bewässerungseinheit betrifft die Kalibrierung der Lenkmotoren bei Start des Systems. Die Kalibrierung musste zuvor manuell durch den Bediener ausgeführt werden. Für einen selbstständigen Betrieb muss der Roboter die Kalibrierung eigenständig durchführen.

Die Funktionsweise der Lenkmotorenkalibrierung wurde so implementiert, dass der „Homing“ genannte Vorgang auch während des Betriebes ermöglicht wird. Der Ablauf des Kalibervorgangs ist **Abbildung 25** zu entnehmen und läuft wie folgt ab.

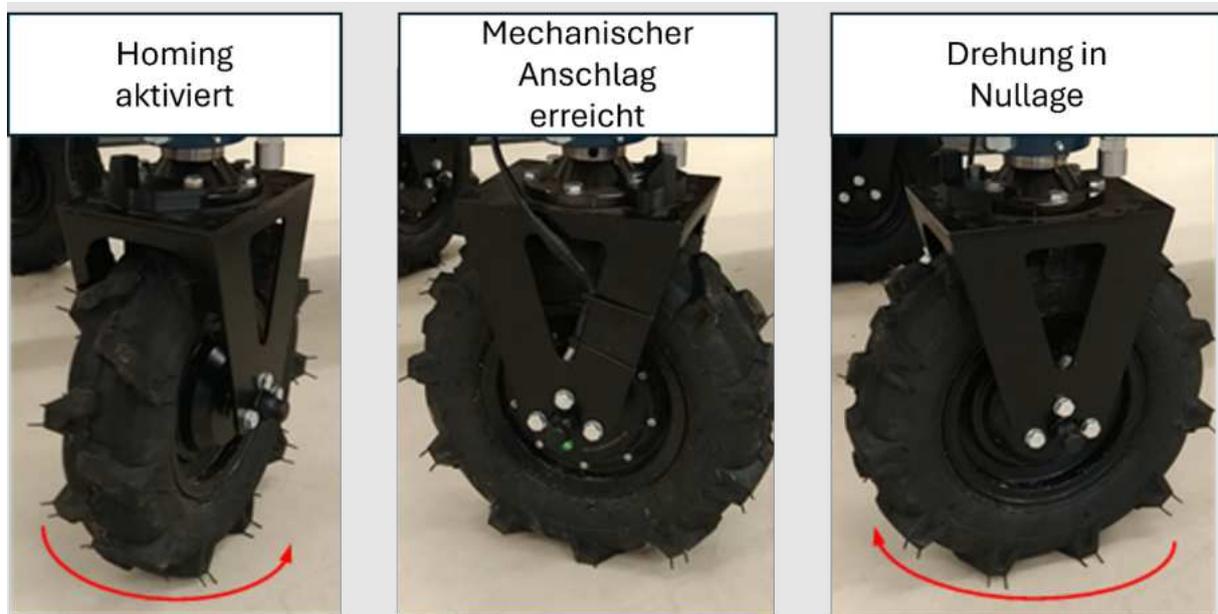


Abbildung 25: Ablauf Lenkungskalibrierung

Die Lenkmotoren drehen die Räder so lange in eine vorgegebene Richtung, bis die Bewegung durch eine Blockade gestoppt wird. Dies ist der Referenzpunkt der Kalibrierung. Zu diesem Zweck sind an den Lenkwellen sowie an den Lagern Anschläge installiert worden, die im Normalbetrieb nicht genutzt werden. Nachdem die Anschläge durch die Blockade erkannt wurden, fährt das Programm die gelenkten Räder zurück in die Neutralstellung. So kann die korrekte Ausrichtung der Hinterräder auch im autonomen Betrieb gewährleistet werden.

Bewässerungskarte

Ein weiterer Optimierungspunkt war die, unter dem Absatz *Inbetriebnahme* bereits erwähnte, Wasserkarte. Diese dient dem Roboter zur Berechnung der auszubringenden Wassermengen. Hier wird das eingemessene Feld in ein beliebig großes Raster unterteilt, welches als Grundlage der Berechnung der Ausbringmenge dient.

Der Bediener muss hierbei lediglich auf einer Graphischen Oberfläche die gewünschten Bewässerungszonen auf dem dargestellten Feld einzeichnen und mit den geforderten Wassermengen versehen.

Die daraus generierten Bewässerungsvorgaben des Roboters dienen zunächst der Volumenstromvorgabe der Bewässerungspumpe. Später sollen diese Daten zusätzlich zur Optimierung der Arbeitsreihenfolge während der Bewässerung verwendet werden. Ein Beispiel eines generierten Raters lässt sich **Abbildung 26** entnehmen.

Fahrstrategie

Der Aufgabenteil der Fahrstrategie beschäftigt sich mit der Generierung der unter *Navigation* bereits erwähnten Pfade. Diese Pfade werden zwischen verschiedenen Posen berechnet. Die Navigationsposen lassen sich in die vier, in **Abbildung 26** benannte, Gruppen unterteilen. Zusehen ist eine Luftaufnahme des Testgeländes am Hof Fleming. Die eingezeichneten Punkte entsprechen den eingemessenen Navigationsposen. Die jeweiligen Gruppen von Posen sind mit Geraden verbunden.

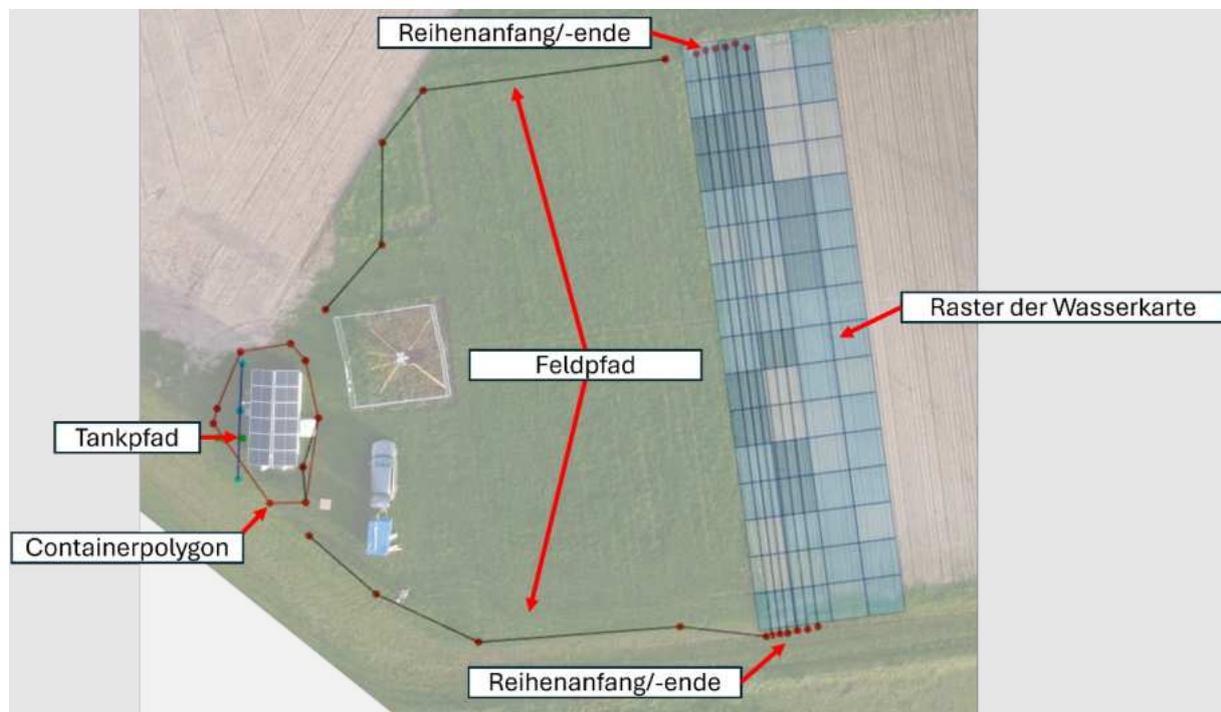


Abbildung 26: Eingemessene Punkte der Fahrstrategie

Durch die Kombination verschiedener Posen ist es dem Roboter möglich sich zu jeder, für den Prozess nötigen, Position zu navigieren. Sobald das induktive Ladegerät integriert wird, werden auch hierfür die entsprechenden Posen eingemessen.

Die Verbindung der einzelnen Posen erfolgt nicht wie in **Abbildung 26** beispielhaft dargestellt durch Geraden, sondern mittels eines rudimentären Dubins-Kurven Algorithmus mit konstanten Radien. Dies ist für den aktuellen Stand des Projektes ausreichend. Die negativen Effekte und deren Behebung werden in dem späteren Abschnitt *Erweiterung der Spurplanung* behandelt.

Der zu diesem Zeitpunkt verwendete Algorithmus nutzte den Fakt, dass sich zwei beliebige Punkte mit beliebiger Ausrichtung über eine Kombination aus zwei Radien und einer Geraden oder einer Kombination aus drei Radien verbinden lassen. Entlang des so entstehenden Pfades werden gleichmäßig Bahnpunkte in einem Abstand von 5 cm verteilt, welche der Spurreglung als Referenz dienen.

Konstruktion induktive Ladeschnittstelle

Nach Bestellung des Ladesystems konnten erste Entwürfe für die induktive Ladeschnittstelle entwickelt werden. Da sich die Position innerhalb des Containers befinden soll und hier kein GNSS-Empfang verfügbar ist erfolgt die Navigation ausschließlich mittels der IMU. Daher muss die Ladeschnittstelle in der Lage sein Abweichungen in der Position und der Ausrichtung zu kompensieren. Der finale Entwurf, welcher nach erhalten des Ladesystems umgesetzt werden sollte ist in **Abbildung 27** dokumentiert.

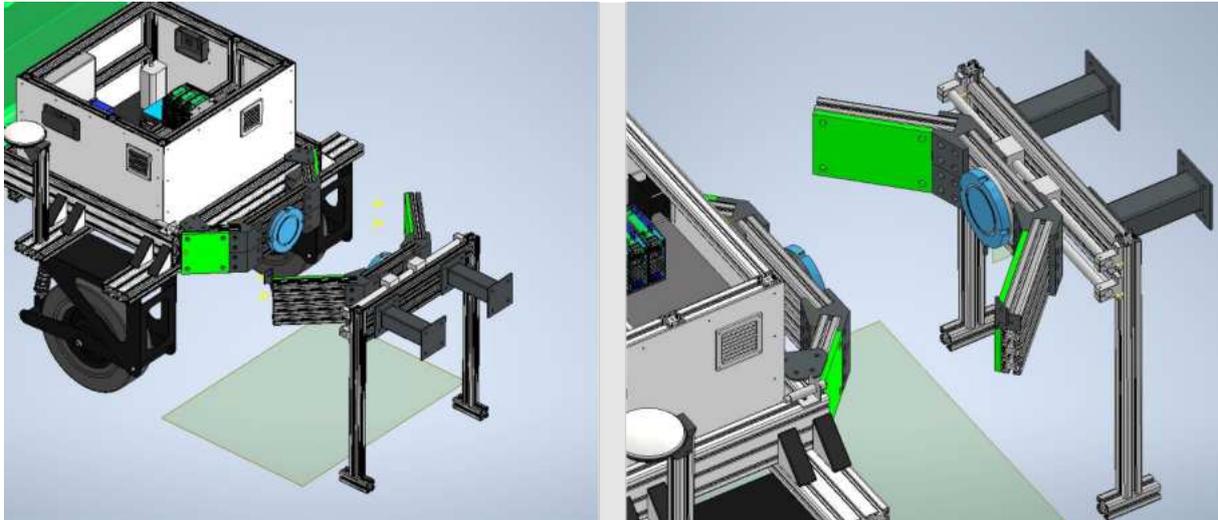


Abbildung 27: Entwurf der Ladeschnittstelle (links: gegen Fahrtrichtung, rechts: in Fahrtrichtung)

Durch die verbaute Schienenführung ist die Schnittstelle in der Lage eine Abweichung in der Position zu korrigieren, während eine drehbare Lagerung der Schnittstelle auf dem Schlitten der Schienenführung für die Kompensation einer Abweichung der Ausrichtung sorgt. Die genaue Funktionsweise wird im Absatz *Ladesystem*, über die Inbetriebnahme der Schnittstelle, erläutert.

Optimierungen an der Versorgungsstation

Im Rahmen der ersten Feldtests ist am bestehenden Betankungskonzept negativ aufgefallen, dass das motorisierte Ventil zu lange im geöffneten Zustand verharren muss, um die nötige Stellenergie für einen reibungslosen Schließvorgang zur Verfügung stellen zu können. Mit einer folgenden Schließdauer von bis zu 10 Sekunden wird die Dauer der Betankung weiter verlängert. Auf diese Weise kann keine adäquate Dosierung der Wassermenge beim Betankungsprozess erfolgen und es existiert das Risiko den Tank überfüllen zu können. Aus diesem Grund wurde das Betankungskonzept verändert, indem anstatt der Verwendung des motorisierten Ventils eine Tauchpumpe in den Zwischentank eingesetzt wurde. Der Schlauch ragt aus dem Tank heraus und ist auf der anderen Seite im Betankungsarm befestigt. Um ein Leerheben des Tanks aufgrund des hydrostatischen Drucks zu verhindern, wurde am obersten Punkt des Schlauchs ein Belüftungsventil eingesetzt. Die bedarfsgerechte Betankung erfolgt nun durch das zeitlich angepasste An- und Abschalten der Tauchpumpe. Die Tauchpumpe hat mit 10.000 L/h eine ausreichende Pumpleistung, dass der Betankungsvorgang in unter einer Minute erfolgen kann.

Ein weiterer Optimierungsbedarf bestand in der Öffnung des Betankungsarms, da das Wasser während des Betankungsvorgangs dazu neigte über die Öffnung des Tankdeckels hinaus zu streuen. Im Zuge dessen wurde eine Düse mit einer Verjüngung konstruiert, die einen sauberen Wasserstrahl erzeugt. **Abbildung 28** stellt die Betankungsdüse in Schnittansicht sowie im gefertigten Zustand dar.



Abbildung 28: Betankungsdüse - Schnittansicht (links) - 3D-gedrucktes Bauteil (rechts)

Weiterhin wurde ein abgedichteter Wasseranschluss für die Grundwasserpumpe an der Wand der Ladestation installiert. **Abbildung 29** zeigt eine entsprechende Außen- und Innenansicht.



Abbildung 29: Wasseranschluss am Stationscontainer - außen (links) - innen (rechts)

Für die IP-Kamera wurde eine Montagehalterung konstruiert und mit einem PLA-Filament 3D-gedrukt. Die Kamera wurde an einer Montagewiseite der PV-Aufständerung mit einem Blick auf das Versuchsfeld montiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Der Funktionsumfang der LABView Entwicklungsumgebung ließ leider keine Integration des Kamerabilds in das Steuerungsdashboard der Anlage zu. Daher wurde zunächst vorgesehen, dass das Bild über einen http-Server als parallele Anwendung im Webbrowser dargestellt wird.

Im Zuge der Automatisierung der Betankungssteuerung wurde die UDP-Kommunikation zwischen der Steuerung der mobilen Bewässerungseinheit und der Steuerungssoftware der Versorgungsstation realisiert und erfolgreich getestet. Dahingehend wurde auch das Steuerungsdashboard ansprechend und übersichtlich gestaltet. **Abbildung 30** stellt die Hauptansicht des Dashboards dar. Hier sind Systemzustände und -werte der Versorgungsstation sowie der mobilen Einheit in separaten Widgets dargestellt. Unterschiedliche Animationen bilden den Zustand der mobilen Einheit ab, je nachdem ob er lädt, betankt wird, Wasser ausbringt oder sich in einem Fehlerzustand befindet. In einem weiteren Widget ist die Fehlerbehandlung aufgehoben. Hier werden Fehlercodes angezeigt und es kann eine Quittierung der Trockenlauferkennung der Grundwasserpumpe erfolgen.

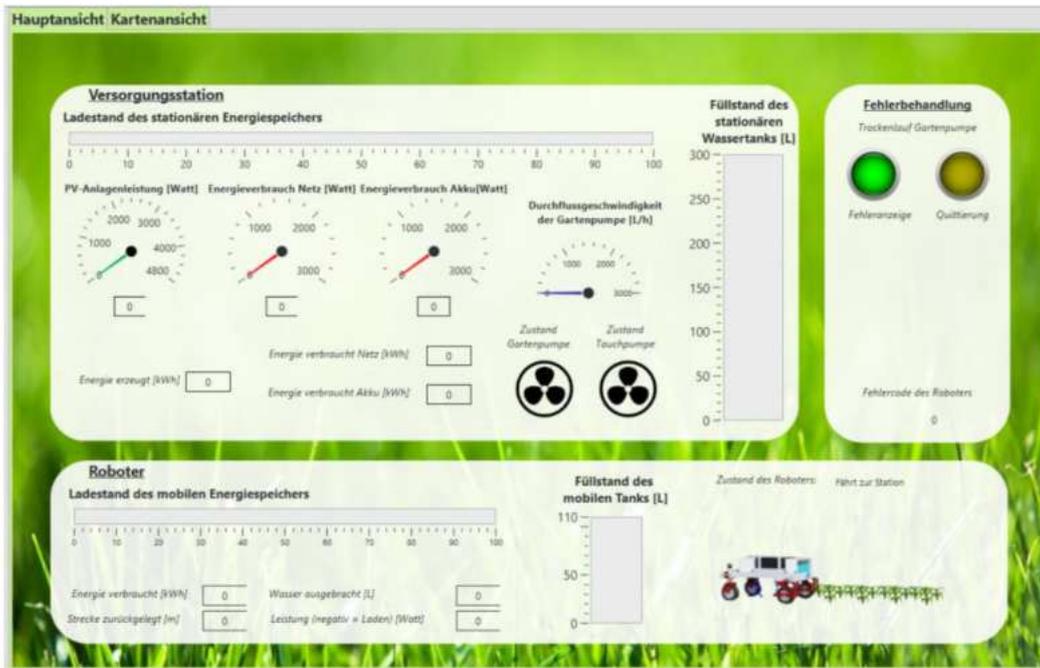


Abbildung 30: Hauptansicht des Steuerungsdashboards

Darüber hinaus wurde eine Kartenansicht implementiert, die es erlaubt die Position und Orientierung der mobilen Einheit auf dem Feld von Remote zu überblicken. Diese lässt sich über das im oberen Teil des Dashboards befindliche Register öffnen. **Abbildung 31** stellt dieses dar.



Abbildung 31: Kartenansicht im Steuerungsdashboard

Durch eine Frostphase im Dezember 2022 kam es zu einem Frostschaden an der Grundwasserpumpe, da sich noch Wasser im Kessel der Pumpe befand. Diese musste ausgetauscht werden und es wurde geplant im kommenden Optimierungszeitraum eine winterfeste Gestaltung der Anlage zu planen.

Feldtest II 4/2023–11/2023 – Systemoptimierung 12/2023-03/2024

Die zweite Feldtestphase fand erneut auf dem Testgelände von Hof Fleming statt. Hier wurden zunächst die Optimierungen der vergangenen Phasen erprobt und validiert. Der, mit Fortschritt des Projektes an Komplexität zunehmende, Arbeitsprozess zeigt auch in dieser Phase weiteres Optimierungspotential.

Feldversuchswesen

Die Arbeiten dieser Phase richteten ihr Hauptaugenmerk auf die reibungslose und effiziente Realisierung eines Arbeitsprozesses von Beginn bis Ende. Es sollte also ein kompletter Zyklus samt Tanken, Bewässern und Laden erfolgen

Ladesystem

Die dafür benötigte Ladeschnittstelle wurde entsprechend des bereits erwähnten Entwurfes umgesetzt. Die verbaute Konstruktion ist in **Abbildung 32** dokumentiert.

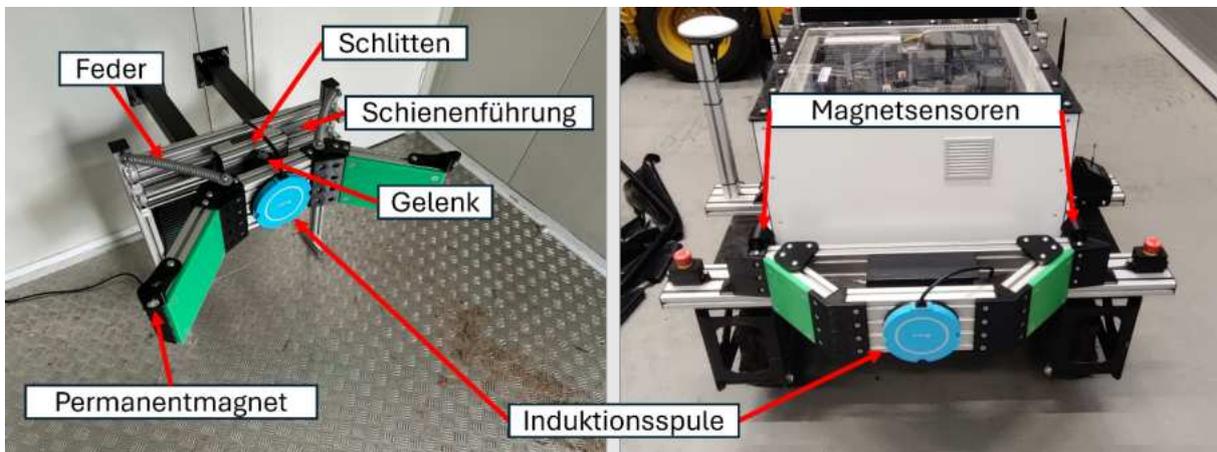


Abbildung 32: Ladeschnittstelle (links: im Container, rechts: am Roboter)

Um eine für den Ladevorgang passende Ausrichtung der Spulen zu garantieren, befindet sich die containerseitige Spule in einer trichterförmigen Baugruppe. Durch konstruktiv eingebrachte Freiheitsgerade ist eine flexible Positionierung möglich. Dies erfolgt über das Verbauen einer horizontalen Schienenführung. In Kombination mit einer drehbaren Lagerung und federgestützten Zentrierung der Baugruppe wird eine Anpassung an die Roboterposition ermöglicht. Nach erfolgreichem Anfahrmanöver gibt der Roboter die Freigabe für den Ladevorgang. Als Impulsgeber werden zwei Magnetsensoren verwendet. Diese sind roboterseitig links und rechts neben der Ladespule angebracht. Diese Sensoren reagieren auf zwei Permanentmagnete, welche stationsseitig an den äußeren Enden der Baugruppe angebracht wurden. Bei korrekter Ausrichtung von Roboter und Ladesystem reagieren die Sensoren auf die Permanentmagneten und geben die Freigabe für den Ladevorgang.

Die durch den Aufbau vergrößerten Dimensionen der Einheit betragen nun in der Länge 1940 mm x Breite 1200 mm x Höhe 660 mm.

Tourenoptimierung

Um die Tourenplanung des Roboters optimal durchführen zu können, wird beim Aufspielen eines neuen Arbeitsprozesses eine Tourenoptimierung vorgenommen. Dieses Mehrschrittige Verfahren

betrachtet eine Vielzahl an Betriebsparametern, um die Effizienz jeder einzelnen Tour und somit auch die Ressourcenschonung zu steigern.

Grundlange der Optimierung ist die bereits erwähnte Wasserkarte. Eines der Kernziele ist das Bestimmen der Arbeitsreihenfolge der Feldreihen. Hier wird darauf geachtet, dass möglichst keine Restmenge im Tank verbleibt. So wird aus jeder Transportfahrt der maximale Nutzen gezogen.

Zur Lösung des betrachteten Optimierungsproblems werden verschiedene Optimierungsverfahren angewandt, welche auf Grund ihres Umfangs in diesem Bericht nicht weiter beschrieben werden.

Einzelzyklus

Die Fertigstellung der Bahnplanungsalgorithmen ermöglicht es die Ablaufsequenz der Feldbewässerung vollständig autonom durchzuführen. Der Ablauf dieser Sequenz gliedert sich dabei in die Abschnitte Start, Tanken, Bewässern und Laden/Ende. Der Inhalt dieser Abschnitte wird im Folgenden beschrieben. Eine simple Übersicht des Ablaufes ist **Abbildung 33** und zu entnehmen. Zudem befindet sich im Anhang ab **Seite 84** eine Fotoserie des Arbeitsprozesses.



Abbildung 33: simpler Ablauf eines Einzelzyklus

- **Start**

Zum Start der Sequenz verlässt der Roboter den Container in Rückwärtsfahrt. Da zu diesem Zeitpunkt keine Lokalisierung vorhanden ist wird die Rückwärtsfahrt zeitlich vorgegeben. Nach dem Ablauf dieses Zeitfenster bleibt der Roboter stehen und schaltet sein GNSS-System ein.

Sobald das GNSS-Signal in RTK-Qualität vorliegt, überprüft die Einheit ob genügend Sicherheitsabstand zum Container vorliegt. Ist dies nicht der Fall wird die Rückwärtsfahrt fortgesetzt. Bei Erreichen des Sicherheitsabstandes plant die mobile Bewässerungseinheit, in Abhängigkeit Ihrer aktuellen Position, den Weg zum Tankarm.

- **Tanken**

Nach Beendigung der Startphase folgt die Einheit dem Pfad entlang des Containerpolygon zum Tankarm. Das Containerpolygon besteht aus manuell eingemessenen Punkten, welche den Bereich um die Basisstation eingrenzen. Durch das Abfahren des Polygons wird somit immer der festgelegte Sicherheitsabstand zur Basisstation eingehalten, um ungewollte Kollisionen zu vermeiden.

Bei Erreichen der Tankvorrichtung beginnt der, unter dem Abschnitt *Betankung* bereits beschriebene, Tankvorgang.

- **Bewässern**

Mit gefülltem Wassertank fährt der Roboter zum Feld und beginnt mit der Bewässerung der einzelnen Reihen. Die Ausbringmenge und die Reihenfolge, nach der die einzelnen Reihen abgefahren werden, ergibt sich dabei aus der im vorherigen Abschnitt erwähnten Tourenoptimierung. Nach Beenden einer Tour zum Feld, begibt sich die Arbeitsmaschine entweder erneut zum Auftanken oder fährt zurück in den Container.

- **Laden / Ende:**

Zum Aufladen des Akkus oder Beenden der Arbeiten fährt der Roboter zurück in den Container, um hier an die induktive Ladestation anzudocken.

Hierzu generiert der Roboter wie in den vorherigen Phasen wieder einen neuen Pfad. Das Erreichen der Ladeschnittstelle wird auf Grund des fehlenden GNSS-Empfangs über die Magnetsensoren des Roboters erfasst und die Ladesequenz initiiert. Mit Abschluss des Ladevorgangs wird entsprechend des Arbeitsprozesses entweder die Bewässerungssequenz fortgesetzt oder der Roboter abgeschaltet.

Display

Die Bewässerungseinheit wurde um ein Display als Bedienungsschnittstelle zur Überwachung und Steuerung einiger wichtiger Betriebsparameter erweitert. Dies ermöglicht die Verwendung der Bewässerungseinheit ohne die Nutzung eines zusätzlichen Rechners, welcher mit dem Steuergerät verbunden ist.

Das Display ist direkt über eine CAN-Bus Schnittstelle mit dem Hauptsteuergerät verbunden und bietet verschiedenste Menüpunkte. Ein Punkt ist hier für den Homingmodus zur Kalibrierung der Lenkung. Unter anderen Menüpunkten können diverse Betriebsparameter wie Akkustände, Temperaturen oder Betriebszustände abgelesen werden. Ebenso bietet das Display eine Möglichkeit den Roboter manuell herunterzufahren, die WLAN-Schnittstellen zurückzusetzen oder den Bewässerungsvorgang zu starten. **Abbildung 34** zeigt das Display mit der Darstellung der verschiedenen Temperaturen im Elektronikmodul des Roboters.

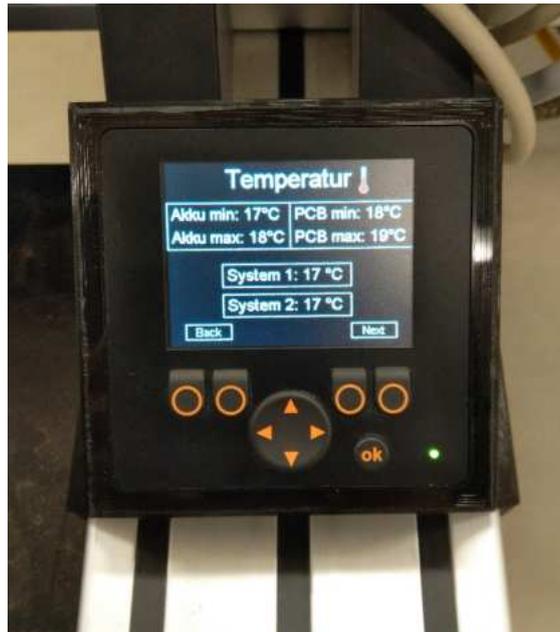


Abbildung 34: Display der Bewässerungseinheit

Optimierungen an der mobilen Bewässerungseinheit

Erweiterung der Spurplanung

Wie in Abschnitt *Fahrstrategie* bereits erwähnt war die bisherige Pfadgenerierung zur Erprobung und Validierung des Arbeitsprozesses ausreichend jedoch nicht als endgültige Lösung geeignet. Ausschlaggebend dafür sind zwei wesentliche Defizite dieser generischen Lösung. Zum einen betrifft dies die ideale Lenkvorgabe des aktuellen Bahnpunktes und zum andern die Anpassbarkeit der Pfadparameter zur Realisierung eines gewünschten Fahrmanövers.

Das Problem der Lenkvorgabe stellt sich wie folgt dar. Durch die Verwendung von konstanten Kurvenradien, kommt es bei der Vorgabe der idealen Lenkwinkel zu Sprüngen bei Übergängen zwischen zwei Pfadsegmenten wie Geraden und Radien. Zu erkennen ist dies anhand der dargestellten Verläufe in **Abbildung 35**. Der links oben dargestellte Streckenverlauf hat den links unten dargestellten Lenkwinkelverlauf. Anhand der senkrechten gestrichelten Linien lassen sich die Sprünge an den jeweiligen Übergängen der Pfadsegmente erkennen. Da dieses Verhalten drastische Auswirkungen auf das Fahrverhalten des Roboters hat, wird an diesen Stellen die Komplexität der Generierung angehoben. Bei der aktualisierten Pfadplanung entsteht ein Verlauf, wie er auf der rechten Seite der **Abbildung 35** zu erkennen ist. Hier werden die Lenkwinkel zunehmend geändert, um plötzliche Lenkwinkeländerungen zu vermeiden. Das sich draus ableitende Fahrverhalten stellt sich deutlich gleichmäßiger dar, was das Anheben der Prozessgeschwindigkeiten erlaubt. Zusätzlich zu dieser Anpassung wurden weitere Pfadgenerierungsalgorithmen entwickelt. Diese ermöglichen das effiziente Realisieren von komplexeren Fahrmanövern wie bspw. Vorgewenden.

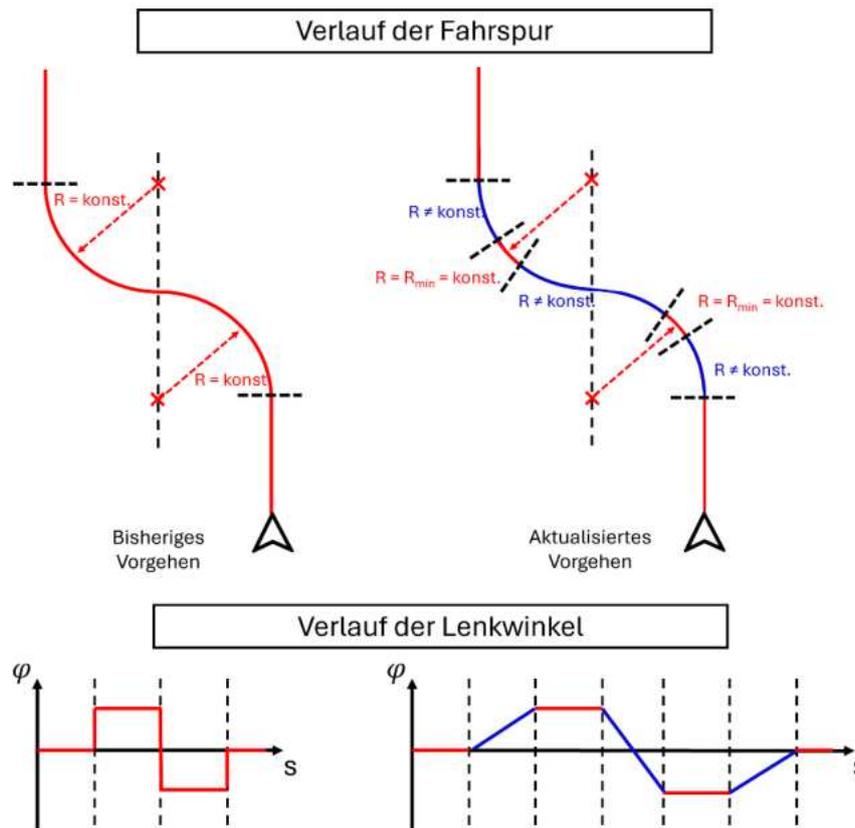


Abbildung 35: Vergleich der Spurplanungskonzepte
(links: bisheriges Vorgehen, rechts: aktualisiertes Vorgehen)

Sicherheitszone

Durch Anheben der Fahrgeschwindigkeiten ergeben sich potenzielle Sicherheitsrisiken, da die mobile Bewässerungseinheit über keine Möglichkeiten der Umfelderkennung verfügt. Somit ist der Roboter nicht in der Lage auf seine Umwelt zu reagieren. Insbesondere im Containerbereich kann hierdurch eine Gefährdung des Forschungspersonals oder Besuchergruppen entstehen.

Um hier das Gefährdungsrisiko zu minimieren, wurde eine Sicherheitszone um den Containerbereich eingerichtet. In dieser ist es dem Roboter nicht möglich über eine festgelegte Höchstgeschwindigkeit hinaus zu beschleunigen.

Einrichten des Dauerbetriebs

Um einen Dauerbetrieb darstellen zu können, musste der bestehende Ablauf des Arbeitsprozesses entsprechend erweitert werden. Eine, im Vergleich zu **Abbildung 33**, ausführlichere Darstellung des Gesamtprozesses ist dem Anhang auf **Seite 83** zu entnehmen.

Optimierungen an der Versorgungsstation

Optimierung des Betankungsvorgangs

Im Zuge der Validierung des autonomen Betriebs wurden weiterhin Betankungsversuche mit der mobilen Einheit unternommen. Dabei mussten sowohl roboterseitig als auch an der Ladestation Optimierungen vorgenommen werden, um einen reibungslosen und zuverlässigen Betankungsbetrieb

sicherzustellen. Auf der Roboterseite umfasste der Optimierungsprozess Kalibrierungen des Tankpfads sowie eine Anpassung an dem Andockmechanismus. Aufgrund des Versatzes zwischen dem Betankungsarm und dessen verstellbarem Endstück kam es während des Betankungsprozesses vermehrt zu Verkeilungen des Tankdeckels. Dieses Problem konnte durch die Anfertigung eines Druckteils zur Einebnung des Versatzes gelöst werden. Darüber hinaus konnten Fehler in der Software der Stationssteuerung identifiziert und beseitigt werden. Dabei kam es zum einen aufgrund einer fehlerhaften Implementierung der Queue-Kommunikation zwischen verschiedenen Prozessen zu Prozessverriegelungen und somit zu Fehlverhalten der Steuerung. Zum anderen wurden die Zustandsmaschinen für die Betankung des Roboters und die Füllstandsteuerung der Ladestation, die je einem Prozess zugeordnet waren, zu einer Zustandsmaschine zusammengefasst, um eine geringere Prozessauslastung und somit eine Effizienzsteigerung zu erreichen. Weiterhin trat beim Anlauf des Betankungsvorgangs Wasser aus dem Belüftungsventil aus. Zur Lösung des Problems wurde ein Schlauch an der Öffnung des Belüftungsventils installiert und zurück in den Tank geleitet.

Automatisierung der Doppeltür

In der Zeit, in der die mobile Einheit kein Wasser ausbringt, verweilt sie in dem dafür vorgesehenen Bereich des Containers, damit sie sowohl vor unbefugtem Zugang als auch vor Witterungseinflüssen geschützt ist. Hierfür ist jedoch das wiederholte Öffnen und Schließen der Doppeltür des Containers vonnöten. Um einen höheren Automatisierungsgrad des Demonstratorsystems zu erreichen, wurde ein Konzept erarbeitet und umgesetzt, dass das automatische Öffnen und Schließen der Türen ermöglicht. Hierfür wurde an jeder Tür ein motorisierter Türöffner mit einem Hebelarm installiert, der auf ein digitales Signal hin die Tür verstellt. Die Ansteuerung des Türöffners erfolgt über die Steuerung der Versorgungsstation, wobei die mobile Einheit die entsprechenden Steuerungsanforderungen über die UDP-Kommunikation initiiert.

Die integrierte Steuerung der Türöffner sorgt dafür, dass die Türen sich nicht weiter öffnen bzw. schließen sobald ein Hindernis die Tür versperrt. So werden notwendige Sicherheitsmaßnahmen abgedeckt. Eine mitgelieferte Fernbedienung ermöglicht das manuelle Öffnen und Schließen der Türen. Zudem ist eine E-Lock-Funktion integriert, sodass sich die Türen bei angelegter Spannung nicht öffnen lassen. Spannungslos lassen sich die Türen mit einem geringen Widerstand manuell bewegen. Eine Schwierigkeit bei der Montage der Türöffner gestaltete sich durch einen hohen Versatz durch den Türrahmen oberhalb der Tür, durch den die vorgesehenen Montage Maße nicht eingehalten werden konnten. Zur Lösung dieses Problems wurde eine verlängerte Abtriebswelle konstruiert und gefertigt, die die vorgesehene Montageposition des Hebelarms an der Tür sicherstellt. **Abbildung 36** veranschaulicht dies und stellt eine Gesamtansicht dar.



Abbildung 36: Türöffner - Detailansicht (links) - Gesamtansicht (rechts)

Beim Testbetrieb der automatisierten Doppeltüren fiel auf, dass die Türöffner die Türen im geöffneten Zustand nicht blockieren und diese durch einen stärkeren Wind verstell werden können. Da die Steuerung der Türöffner keine Rückführung über den Öffnungszustand der Türen erlaubt, kann auf diese Weise weder die mobile Einheit noch die Versorgungsstation auf dieses Problem reagieren. Im Zuge dessen wurde eine Sensorlösung zur Erfassung des Öffnungszustands implementiert. Das Prinzip lässt sich anhand von **Abbildung 37** veranschaulichen. Zwischen dem Flansch des Türöffners und der Abtriebswelle ist ein Druckteil angebracht, in das ein ferromagnetisches Werkstück eingelassen ist. Im vollständig geöffneten Zustand befindet sich dieses vor einem induktiven Sensor. Schon bei einem geringfügigen Schließen der Tür entfernt sich das Metallstück vom Sensor, sodass eine Zustandsänderung erfasst werden kann. Das Signal wird in der Steuerung der Versorgungsstation ausgewertet und an die mobile Einheit kommuniziert, sodass diese im Fehlerfall anhält und die Station die Tür nachstellen kann.



Abbildung 37: Türöffnungssensor im montierten Zustand

Untersuchungen im Rahmen des Überwinterungskonzeptes

Im Winter 2022 kam es frostbedingt zu Schäden an der Grundwasserpumpe, wodurch diese ausgetauscht werden musste. Infolgedessen wurden Überlegungen getroffen, wie die Anlage für eine Überwinterung sicher gemacht werden kann. Hierzu wurde untersucht, ob mit der vorhandenen Photovoltaikanlage ein Heizbetrieb im Winter möglich wäre. Es wurde als Anforderung definiert, dass im Stationscontainer eine typische Frostschutztemperatur von 3°C herrschen soll, sodass Wasser, das nicht vollständig entleert wurde, nicht gefrieren kann. Zudem wird bei dieser Temperatur ein sicherer Betrieb der Energiekomponenten in der Ladestation gewährleistet. Zur Ermittlung der nötigen Heizleistung wurde der Istzustand des Containers thermisch modelliert und eine Simulation durchgeführt. Als Außentemperatur wurde die Normtemperatur zur Auslegung von Dämmungen in Deutschland von -11°C als konstant definiert. Als Worst-Case wurde 1 kWh von der Photovoltaikanlage angenommen, um den Container beheizen zu können. Es stellte sich heraus, dass mit der vorhandenen Energie eine Heizdauer von ca. 4 Stunden möglich wäre. Bei der gegebenen Wärmespeicherkapazität des Containers würde die Raumtemperatur ohne Heizleistung innerhalb von einer halben Stunde unter null fallen. Folglich müsste der restliche Heizbedarf über Netzstrom abgedeckt werden. Das Einbringen einer zusätzlichen Dämmung von 80mm Stärke an jeder Wandseite und an der Decke würde die Heizdauer auf 6.5 Stunden anheben. Das Verwenden stärkerer Dämmschichten wäre nicht mit dem Platzbedarf vereinbar. Infolgedessen wurde beschlossen, dass die Verwendung zusätzlicher Dämmung in den Maßen keinen nennenswerten Mehrwert bringen würde und stattdessen bei Extremtemperaturen mit Netzstrom nachgeheizt werden müsse.

Portierung der Steuerungssoftware

Bei der für die Programmierung der Steuerungssoftware verwendeten Entwicklungsumgebung LabVIEW NXG wurde der Support durch den Betreiber im Winter 2022 vollständig eingestellt. Dadurch wurden Weiterentwicklungsmöglichkeiten sowie der Zugriff auf Dokumentationen stark eingeschränkt. Im Zuge dessen ist eine Portierung der Steuerungssoftware auf eine alternative Entwicklungsumgebung beschlossen worden. Hierfür wurde das Anwendungsframework Qt ausgewählt, das sich sowohl für eine intuitive Entwicklung grafischer Nutzeroberflächen als auch für die Programmierung von Steuerungsanwendungen eignet.

Qt bietet gegenüber dem zuvor verwendeten Produkt einen deutlichen Mehrwert hinsichtlich der Performance, der Flexibilität aber auch der Dokumentation. Einige Einschränkungen, die in LabVIEW NXG bestanden, ließen sich mit Qt umgehen. Hierzu gehört die Einbettung des Videostreams der Stationskamera in die grafische Nutzeroberfläche sowie die Nutzung von aktuellen Karten zur Lokalisierung der mobilen Einheit, auf denen neben der Position der mobilen Einheit auch dessen Orientierung dargestellt werden kann.

Die Flexibilität von Qt ist insbesondere dadurch gegeben, dass beliebige C++-Bibliotheken in den Code integriert werden können, was bei LabVIEW nicht der Fall war. Weiterhin wird beim Kompilieren von Qt-Programmen eine .exe-Anwendung erstellt, die direkt ausführbar ist. Bei LabVIEW war dies nur durch eine besondere Lizenz möglich, die periodisch aktualisiert werden musste. Somit musste bei jedem Anwendungsstart die gesamte Entwicklungsumgebung hochgefahren werden, wodurch erhebliche Wartezeiten in Kauf genommen werden mussten. Hinsichtlich der Performance hat Qt zudem den Vorteil, dass es eine Funktionalität besitzt, Prozesse in einer effizienten Art und Weise zu verwalten. Die Implementierung erfordert dabei nur wenige Schritte, was zu einer hohen Übersichtlichkeit des Codes beiträgt.

Im Rahmen der Systemoptimierungsphase konnte die Software finalisiert und erfolgreich getestet werden. Der finale Softwarestand sowie die durchgeführten Änderungen bei der Portierung werden im Folgenden ausgeführt.

Kommunikation mit dem Energiemanagementsystem

Das Energiemanagementsystem CCGX stellt die zentrale Einheit des Energiesystems im Container dar. Es kommuniziert mit den Energiesystemkomponenten (Wechselrichter, Akkumulator, MPPT-Regler) und steuert und überwacht die Energieflüsse. Die von den Komponenten übermittelten Daten werden in einem Hardwareregister des CCGX zwischengespeichert und können über die Ethernet-Schnittstelle mit dem Übertragungsprotokoll Modbus-TCP von einem externen Teilnehmer bezogen werden.

Für die Übersicht auf der Benutzeroberfläche bzw. zur Auswertung von energiebezogenen Daten sind insbesondere der Ladezustand des Akkus und die Nutzleistungen der PV-Anlage, des Akkus sowie des externen Stromnetzes von Interesse. Für den Bezug dieser Daten vom CCGX wurde ein Qt-Prozess implementiert, der zum Start der Anwendung ein TCP-Socket aufbaut und anschließend sekundlich in einem Modbus-Frame die Daten anfragt. Sobald die Daten empfangen wurden, werden diese über eine Nachrichten-Queue (Queue: Warteschlange, die abgearbeitet wird, sobald der Prozess wieder einen Zugriff auf die CPU erhält) an den Prozess, der die Benutzeroberfläche verwaltet, gesendet. Leistungsdaten werden zusätzlich über den laufenden Betrieb integriert und in Form von kumulierten Energiemengen ebenfalls übermittelt.

Die portierte Version unterscheidet sich an dieser Stelle hinsichtlich der Funktionsweise nicht wesentlich von der vorherigen LABVIEW-Version. Lediglich die Implementierung in Form von C++-Code

an Stelle des blockbasierten grafischen Programmcodes und die Verwendung eines objektorientierten Ansatzes stellen eine Neuerung dar.

Kommunikation mit dem Analog-Digital-Wandler

Der Analog-Digital-Wandler (ADC) stellt die Schnittstelle zwischen der Anwendung und den Aktoren sowie Sensoren der Ladestation dar. Die Kommunikation zwischen der Steuerung und dem ADC erfolgt über eine RS232-Schnittstelle mit einem Modbus-ähnlichen Befehlssatz. Im Zuge der Portierung wurde ein Qt-Prozess implementiert, der das Senden und Lesen der Daten der Schnittstelle mit dem genannten Übertragungsprotokoll verwaltet. Beim Start der Anwendung identifiziert der Prozess zunächst automatisch den COM-Port, an dem der ADC aktiv ist. Dies war mit der vorherigen Version aufgrund der Limitierung von LABVIEW nicht möglich und der aktive COM-Port musste bei jedem Neustart der Plattform mit einer Zusatzsoftware manuell identifiziert und in der Steuerungssoftware vor der Kompilierung ausgewählt werden.

Ist der richtige COM-Port initialisiert, so wird die Abfrageroutine aktiviert und der Prozess fragt periodisch sämtliche Sensorwerte der Station ab. Im Vergleich zu der vorherigen LABVIEW-Version wurden der Durchflusssensor sowie der Füllstandsensor des Stationstanks um weitere Sensoren ergänzt, die den Öffnungszustand der automatischen Containertüren erfassen. Damit wird ein reibungsloses Hineinfahren der mobilen Einheit ermöglicht. Die Sensorwerte werden nach Aufbereitung durch den Prozess über Nachrichten-Queues je nach Verwendungszweck an weitere Prozesse für die Steuerungslogik, die Benutzeroberfläche und/oder die Roboterkommunikation übermittelt.

Die Ansteuerung der Aktoren der Station, zu denen die Wasserpumpen und die automatische Doppeltür gehören, wird über den Prozess der Steuerungslogik initiiert. Dies erfolgt mittels Nachrichten-Queues an den ADC-Prozess, abhängig vom Steuerungszustand. Wurde ein Steuerbefehl übermittelt, so sendet der Prozess die Anforderung an den ADC im nächstmöglichen Nachrichtenfenster.

Kommunikation mit der mobilen Einheit

Für die Station-Roboter-Kommunikation wurde ebenfalls ein Qt-Prozess programmiert. Dieser erstellt und initialisiert einen UDP-Socket und verwaltet das Senden und Empfangen von Daten. Die im Sekundentakt von der mobilen Einheit empfangenen Daten-Frames werden aufbereitet und per Nachrichten-Queues an die Prozesse verteilt, die die einzelnen Daten benötigen.

Es wird ebenfalls ein Daten-Frame pro Sekunde an die mobile Einheit gesendet, um diesen per Handshake den Eingang von Befehlen zum Betanken oder Türöffnen zu bestätigen oder wichtige Zustandsänderungen der Station zu übermitteln. Hierzu gehört der Öffnungszustand der Tür oder die Beendigung der Betankung. Auch wenn keine Nutzdaten übertragen werden sollen, so wird dennoch immer ein Daten-Frame gesendet, um die Erreichbarkeit der Station zu überprüfen. Der Inhalt der Nachricht an die mobile Einheit wird von dem Prozess der Steuerungslogik manipuliert. Eine funktionale Änderung durch die Portierung in Bezug auf die LABVIEW-Version betrifft die Erweiterung des Nachrichten-Frames um Zustandswerte und Befehle für die automatische Türöffnung.

Steuerungslogik

Der Qt-Prozess für die Steuerungslogik stellt den Kern der Stationssoftware dar. Dieser trifft basierend auf den internen Zuständen einer Zustandsmaschine und Sensorwerten oder empfangenen Befehlen Entscheidungen über die in der Versorgungsstation stattfindenden Vorgänge. Das in **Abbildung 38** dargestellte Diagramm veranschaulicht den Aufbau der Zustandsmaschine in der neuen Softwareversion. Der Zustand „Füllstand OK“ beschreibt den Initial- und Ruhezustand, in dem die Software darauf wartet, dass entweder die mobile Einheit einen Befehl zum Betanken oder zum Türöffnen sendet oder der Füllstand des Stationstanks die Mindestfüllhöhe unterschreitet. Tritt eine dieser Meldungen auf, so bewirkt sie einen Zustandswechsel in den jeweiligen Zweig. Dabei werden die Anforderungen der mobilen Einheit priorisiert behandelt, da das Nachfüllen des Stationstanks kein zeitkritischer Prozess ist und erfolgen kann, wenn die mobile Einheit wieder auf das Feld fährt oder im Container zum Stehen kommt.

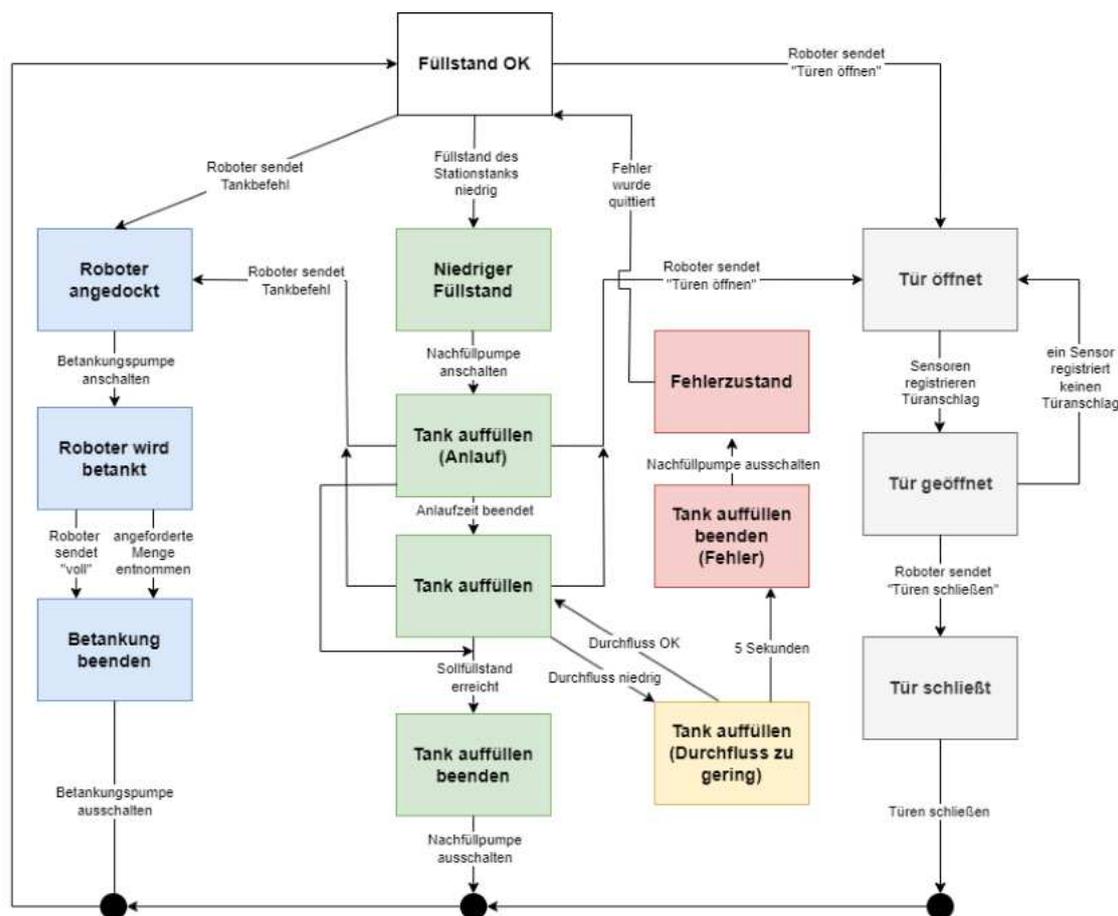


Abbildung 38: Aufbau der Zustandsmaschine der Stationssteuerung

Ist die Mindestfüllhöhe des Stationstanks unterschritten so wird zunächst per Befehl an den ADC die Nachfüllpumpe angeschaltet und der Zustand wechselt in den Pumpenanlauf. Hierbei wird 10 Sekunden gewartet und vorausgesetzt, dass nach Ablauf dieser Zeit die Pumpe sich im angelaufenen Zustand befindet und eine konstante Durchflussrate gemessen werden kann. Der Prozess wechselt folglich in den Zustand „Tank auffüllen“. In diesem Zustand wird die Durchflussrate der Pumpe gemessen, um ein mögliches Trockenlaufen der Pumpe erfassen zu können. Ist der Pumpendurchfluss zu niedrig, so wechselt der Prozess in einen Zustand, indem mit einer Frist von 5 Sekunden überprüft wird, dass es sich dabei nicht um temporäre Messfehler handelt. Hat sich die Durchflussrate innerhalb dieser Zeit nicht wieder auf ein Mindestmaß aufgebaut, so wird die Pumpe abgeschaltet und der Prozess wechselt in einen Fehlerzustand, der vom Fachpersonal quittiert werden muss. Andernfalls erfolgt das Befüllen des Tanks bis der Sollfüllstand erreicht ist und die Pumpe schließlich abgeschaltet

wird. Anschließend kehrt wieder der Ruhezustand ein. Erfolgt beim Befüllen des Stationstanks eine Anforderung durch die mobile Einheit, so wechselt der Zustand direkt zu dem jeweiligen Zweig und der ADC wird mit dem jeweiligen Befehl überschrieben. Die Nachfüllpumpe wird folglich automatisch abgeschaltet.

Der blau dargestellte Zweig beschreibt den Betankungsprozess der mobilen Einheit. Erfolgt eine Anforderung durch die mobile Einheit zum Betanken, navigiert der Prozess in den Zustand „Roboter angedockt“. Per Befehl an den ADC wird die Betankungspumpe angeschaltet und im Folgezustand darauf gewartet, dass entweder die zuvor von der mobilen Einheit angeforderte Wassermenge aus dem Tank entnommen wurde oder sie der Station das Erreichen des Maximalfüllstands meldet. Durch diese Redundanz wird verhindert, dass die mobile Einheit im Falle eines Sensordefekts überfüllt wird und Wasser in die Elektronik gelangt. Erfolgt eine der Meldungen, so wird im Folgezustand das Abschalten der Betankungspumpe initiiert und es kehrt der Initialzustand ein.

Im grau dargestellten Zustandszweig verarbeitet die Software den Vorgang, bei dem die mobile Einheit in die Station zum Parken oder zum Laden hineinfährt. Die mobile Einheit initiiert den Zustandswechsel in diesen Zweig durch das Senden eines Befehls zum Öffnen der Türen an die Station. Solange die automatischen Türöffner die Türen öffnen, wartet die mobile Einheit mit ausreichendem Abstand vor der Doppeltür des Containers. Registrieren die Sensoren einen Anschlag beider Türen, wechselt der Prozess in den Zustand „Tür geöffnet“ und nach einer Benachrichtigung durch die Station fährt die mobile Einheit langsam in den Container hinein. Registriert mindestens ein Türsensor beim Hineinfahren keinen Türanschlag mehr, wenn zum Beispiel der Wind eine Tür auslenkt, wird die mobile Einheit alarmiert und der Zustand wechselt zurück in „Tür öffnet“. Die mobile Einheit kommt dann so lange zum Stehen, bis die automatischen Türöffner beide Türen vollständig geöffnet haben. Ist die mobile Einheit im Container zum Stehen gekommen, sendet diese der Station eine Anforderung zum Schließen der Türen und es kehrt wieder der Initialzustand ein. Das Hinausfahren der mobilen Einheit aus dem Container funktioniert analog dazu.

Benutzeroberfläche

Für die Darstellung der Benutzeroberfläche wurde ein Qt-Prozess mit einer entsprechenden GUI-Engine aufgesetzt. Die Engine rendert in der Programmlaufzeit die mit der sog. Qt Modelling Language (QML) deklarativ beschriebenen grafischen Elemente. Das Steuerungsprogramm kann über die Schnittstelle, die durch die Engine zur Verfügung gestellt wird, mit der GUI kommunizieren und auf die dargestellten Werte Einfluss nehmen. Die QML umfasst einen umfangreichen Satz vorimplementierter darstellender Instrumente und Applets. Hierzu gehört der im Rahmen der Portierung genutzte Videoplayer zur Einbettung des Kamerabilds in die Benutzeroberfläche sowie eine Karten-API zur Darstellung der Position und Orientierung der mobilen Einheit auf dem Versuchsgelände. Die zur Darstellung der Systemwerte und -zustände verwendete Hauptansicht wurde nach Vorbild der LABVIEW-Version mit Instrumenten und grafischen Elementen der GUI-Engine implementiert. Die Ansichten können mit Swipe-Gesten gewechselt werden. Folgende Abbildungen stellen die Ansichten in unterschiedlichen Beispielszenarien dar.

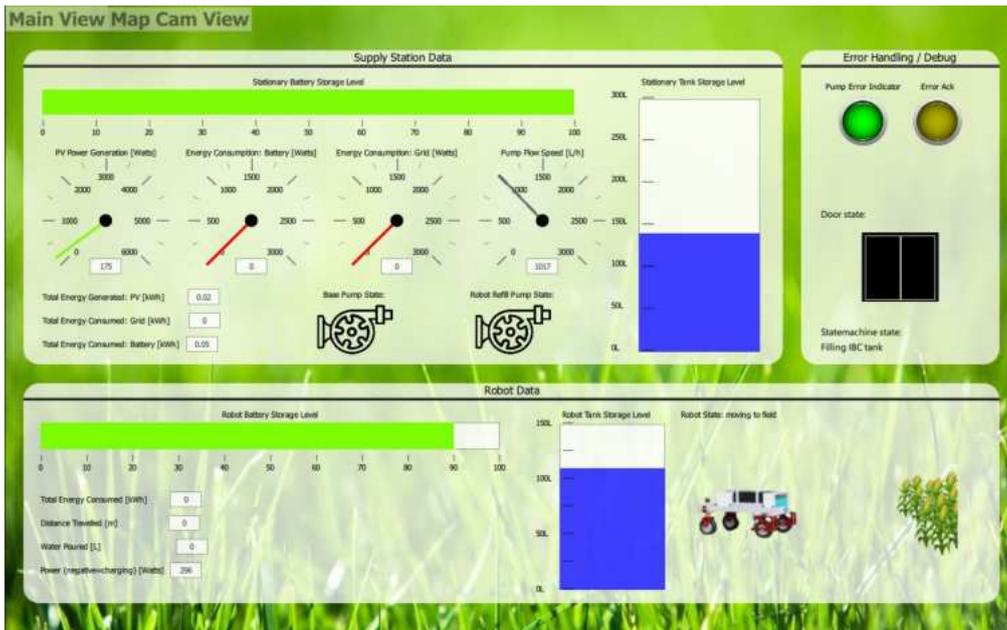


Abbildung 39: Hauptansicht der Benutzeroberfläche

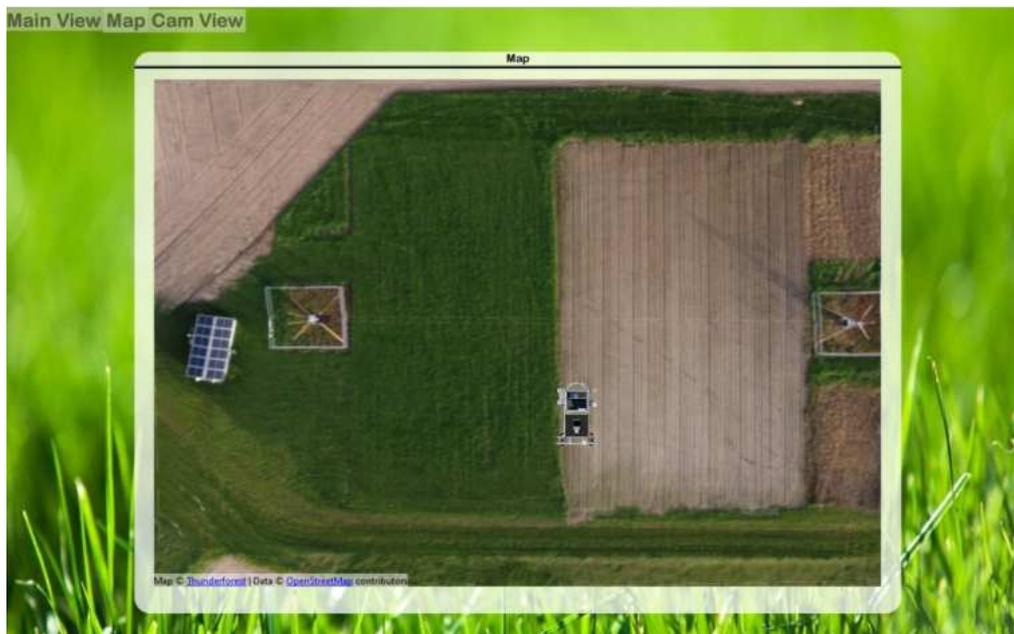


Abbildung 40: Kartenansicht der Benutzeroberfläche

Entwicklung eines bidirektionalen induktiven Ladesystems

Während des Versuchsbetriebs konnte gezeigt werden, dass die Dimensionierung des induktiven Ladegeräts in entsprechender Kombination mit der Batteriekapazität der Bewässerungseinheit für die bewirtschaftete Versuchsfläche ausreicht. Für ein mögliches Folgeprojekt ist eine Vision entstanden, die von einem Schwarmkonzept ausgeht. Dabei soll simultan eine Mehrzahl an mobilen Einheiten für die Bewässerung größerer Felder verwendet werden. Für die entsprechende Energie- und Wasserversorgung ist weiterhin ein einzelnes stationäres System angedacht.

In diesem Kontext wäre das vorhandene Ladesystem mit einer Ladedauer von bis zu fünf Stunden pro Einheit weit unterdimensioniert. Eine Nachrüstung der Versorgungsstation um weitere Systeme stellt eine Option dar. Diese geht jedoch von einem erhöhten Platzbedarf in der Versorgungsstation aus und ist erwartungsgemäß mit höheren Kosten gegenüber einer größer dimensionierten Einzellösung verbunden. Zudem besteht das Potential die mobilen Einheiten in Zeiten außerhalb der Bewässerungsperioden als Energiespeicher zu nutzen. Auf diese Weise lässt sich der von der Photovoltaikanlage erzeugte Strom zwischenspeichern und im landwirtschaftlichen Betrieb nutzen, um zum Beispiel Lastspitzen zu kompensieren. Hierfür muss das Ladesystem jedoch fähig sein die Energie bidirektional zu übertragen. Während es auf dem Markt bereits einige Anbieter gibt, die kontaktlose Ladesysteme für den mobilen Einsatz und in der geforderten Leistungsklasse vertreiben, sind bidirektionale Ladelösungen im kommerziellen Kontext bisher dem Automobilsektor vorbehalten.

Vor diesem Hintergrund entstand die Motivation ein an den speziellen Zweck angepasstes, bidirektionales, induktives Ladesystem zu entwickeln. Hierfür soll mit der Auslegung und des Aufbaus eines Funktionsmusters ein Grundstein gelegt werden. Das Funktionsmuster soll befähigt sein den Ladeleistungsbereich der Batterie von bis zu 3 kW mit einem effizienten Betrieb stellen zu können. Auf diese Weise soll die Ladedauer entsprechend reduziert werden, um den parallelen Betrieb von mindestens drei Bewässerungseinheiten gewährleisten zu können. Zudem soll die Einheit die Energie über das Übertragungssystem mit derselben Entladeleistung zurück transferieren können. Zur Erreichung dieses Ziels erfolgt nach der Identifikation wichtiger Auslegungsaspekte basierend auf der einschlägigen Literatur ein iterativer Auslegungsprozess mithilfe von analytischen sowie simulativen Methoden. Nach erfolgter Auslegung wird das System aufgebaut und in den geforderten Arbeitsbereichen validiert.

Feldtest III 4/2024 – 8/2024

In der, durch die Verlängerung des Projektes ermöglichten, dritten Testphase galt es, neben der Validierung der erarbeitenden Optimierungen, eine ausgiebige Erprobung sowie Bewertung des entwickelten Gesamtsystems durchzuführen. Diese Testphase wurde daher insbesondere zur kritischen Betrachtung des Arbeitsprozesses auch in Hinblick auf Empfehlungen für die Praxis genutzt.

Regelmäßige Durchführung von praktischen Feldversuchen

Für die Feldversuche wurde eine Versuchsparzelle von insgesamt 40 m x 48 m in zwei Parzellen angelegt. Auf Parzelle I wurde Grünland gesät. Es handelt sich dabei um reguläre Standard-Grünlandmischung. Diese Teilfläche dient im Wesentlichen für unspezifische Fahr- und Bewässerungsversuche ohne große Genauigkeitsanforderungen.

Auf Versuchsparzelle II stehen auf einer Fläche von 40 m x 24 m 32 Reihen Mais. Die 32 Reihen sind in 4 Beete mit jeweils 8 Reihen aufgeteilt. Die 4 Beete werden im Rhythmus von 7 bis 10 Tagen umlaufend erneuert, so dass immer Pflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien für Navigations- und Bewässerungsversuche zur Verfügung stehen. Die Anzahl von Reihen in den unterschiedlichen Wachstumsstadien ist ausreichend dimensioniert, um auch einen Pflanzenverlust durch etwaige Navigationsfehler ausgleichen zu können. Der Austausch der Pflanzen zwischen 28 und 40 Tagen nach dem Legen ist auch deshalb notwendig, da der aktuelle Demonstrator eine Wuchshöhenbeschränkung hat.



Abbildung 41: Versuchsparzelle I



Abbildung 42: Versuchsparzelle II



Abbildung 43: Versuchsparzelle III



Abbildung 44: Versuchsparzelle III

Die Versuche mit dem Roboter ohne Begleitung durch die Mitarbeiter des OG Mitglieds Hochschule Osnabrück wurden bisher ausschließlich mit dem Handcontroller durchgeführt. Der rein autonome Betrieb wurde zunächst im Beisein der Mitarbeiter der Hochschule durchgeführt und erst im Verlaufe der Testphase allein.

Für die Nutzung des Roboters durch den Hof Fleming wurde eine Sicherheitsunterweisung durchgeführt. In einer Verfahrensanweisung sind alle relevanten Abläufe niedergeschrieben, so dass die sichere Bedienung auch ohne das OG Mitglied Hochschule Osnabrück sehr einfach möglich ist.

Im Rahmen der Versuche werden Parameter für die weitere Entwicklung erfasst. Dazu zählt die Überprüfung der ausgebrachten Wassermenge ebenso wie die Zeiten für Befüllung, Wegstrecken und Ausbringung.

Wiederholgenauigkeit

Die Betrachtung des Gesamtsystems erfolgte anhand einer Reihe von Dauertest. Hierzu wurden vordefinierte Arbeitsprozesse für eine gewünschte Anzahl Wiederholungen durchgeführt. Zwischen den Arbeitsprozessen werden Betriebsparameter wie Reihenanzahl, Ausbringmenge und Reihenfolge variiert. Die Arbeitsergebnisse der verschiedenen Arbeitsprozesse sowie ihrer Wiederholungen ließen sich anschließend gegenüberstellen und auf Wiederholgenauigkeit und Zuverlässigkeit untersuchen. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine exemplarische Betrachtung anhand der Beurteilung der Reihenfahrten und der Ladeleistungen.

Zur Betrachtung der Reihenfahrt werden zwei verschiedene Arbeitsprozesse verwendet, welche auf der linken Seite der **Abbildung 45** dargestellt sind. Der, in orange eingefärbte, Arbeitsprozess umfasst zwei Touren mit jeweils drei Reihen. Der zweite, in dunkellila eingefärbte, Prozess umfasst eine Tour mit zwei Reihen. Anhand einer detaillierteren Betrachtung der rot markierten Reihe, welche in beiden Prozessen enthalten ist, lässt nun die Wiederholgenauigkeit der Reihenfahrt überprüfen. Die auf der rechten Seite der **Abbildung 45** darstellte Detailaufnahme zeigt eine Auswahl an Messungen, welche jeweils drei Wiederholungen des jeweiligen Arbeitsprozesses dokumentieren. Dargestellt sind die GNSS-Positionsdaten der Bewässerungseinheit während der Reihenfahrt.

Wiederholbarkeit der Arbeitsprozesse

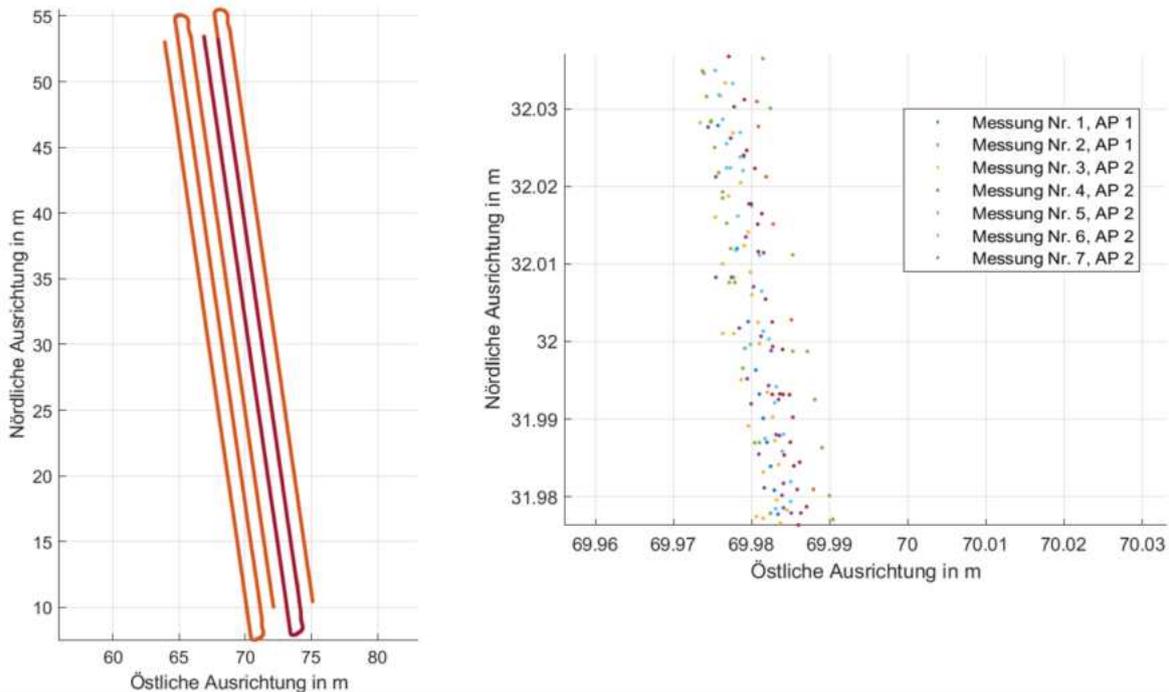


Abbildung 45: Wiederholgenauigkeit der Arbeitsprozesse
(links: Gesamtaufnahme der Feldreihen, rechts: Detailaufnahme einer Feldreihe)

Anhand der Verteilung der Positionsdaten lässt sich eine überwiegende Streuung im Sub-Zentimeter-Bereich erkennen. Somit ist eine ausreichende Präzision in der Wiederholung des Arbeitsprozesses gewährleistet.

Ein Weiterer Aspekt, der eine gute Referenz der Wiederholgenauigkeit bietet, ist die Ladeleistung des induktiven Ladegerätes. Da diese trotz flexibler Ausrichtung stark von der Position des Roboters abhängt.

Deutlich wird dies anhand der manuell angefahrenen Positionen auf **Abbildung 46**. Zu erkennen ist eine schlechte Ausrichtung (**Abbildung 46**, links) und eine optimale Ausrichtung (**Abbildung 46**, rechts). Der in **Abbildung 46** mittig dargestellte Messschrieb zeigt die Ladeleistung über einen Zeitraum von 5 min. Alle Leistungskurven weisen einen sinusförmigen Verlauf auf. Im Falle der schlechten Ausrichtung (dunkelblau) führt dieser Verlauf zu einer durchschnittlichen Ladeleistung von 614,5 W. Die durchschnittliche Ladeleistung bei optimaler Ausrichtung (orange) liegt hingegen bei 753,25 W.

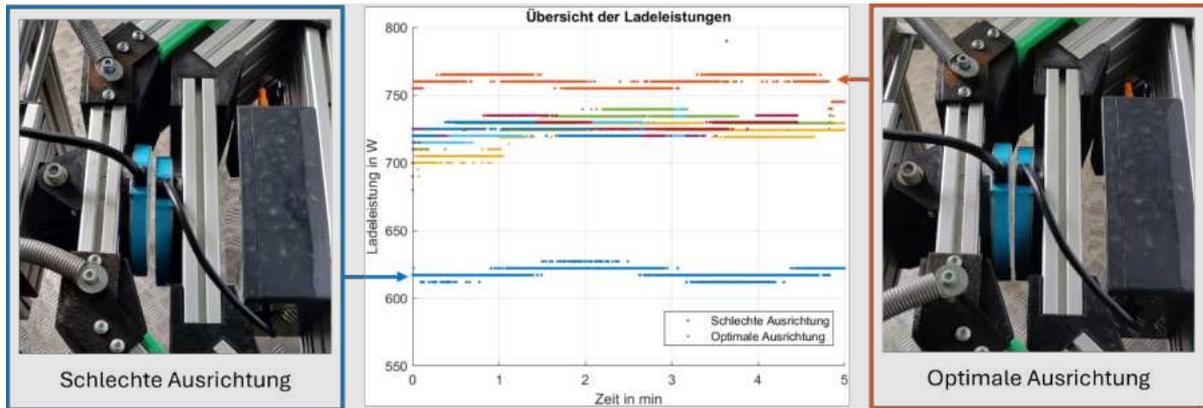


Abbildung 46: Wiederholgenauigkeit der Ladeleistung

(links: Schlechte Ausrichtung, mitte: Übersicht der Ladeleistungen, rechts: Optimale Ausrichtung)

Alle weiteren eingezeichneten Messungen entstammen aus automatischen Ladevorgängen. Wie bereits am Messchrieb zu erkennen ist liegen diese sehr nah beieinander. Dies spiegelt auch an diesem Teil des Arbeitsprozesses eine gute Wiederholgenauigkeit wider. Die Messungen liegen im Durchschnitt bei einer Ladeleistung, von 725,35 W was zusätzlich zur Genauigkeit auch eine gute Ausrichtung widerspiegelt.

Energetische Betrachtung

Zusätzlich zur Betrachtung der Wiederholgenauigkeit erfolgte auch eine Betrachtung des Energieaufwandes der mobilen Bewässerungseinheit. Ziel dieser Betrachtung war zum einen der Wissensaufbau für zukünftigen Konzeptphasen anderer Projekte. Zu anderen sollte eine bessere Einschätzung des Energiebedarfs einer möglichen Praxisempfehlung gewonnen werden. Hierzu werden exemplarisch der Energiebedarf des Bewässerungsapparates und die Auswirkung der Zuladung auf den Leistungsbedarf des Fahrtrieb betrachtet.

Der Energiebedarf des Bewässerungsapparates beschränkt sich im Wesentlichen auf die benötigte Pumpenleistung. Eine exemplarische Auswertung der Messdaten führte zu den in **Abbildung 47** dargestellten Ergebnissen. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Daten der Pumpenleistung über das Flächenbewässerungsäquivalent aufgetragen. Die Arbeitsgeschwindigkeit, welche dem Flächenbewässerungsäquivalent zu Grunde liegt, entsprach hier $\sim 1,25 \text{ km/h}$ bzw. $0,35 \text{ m/s}$.

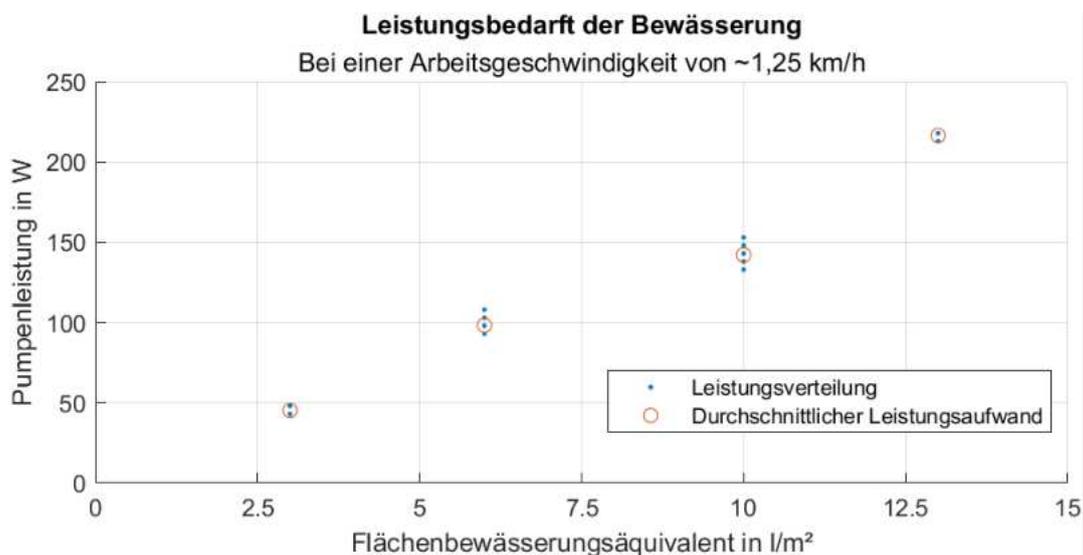


Abbildung 47: Leistungsbedarf des Bewässerungsapparates

Die in blau dargestellten Leistungsbedarfe weisen über eine Vielzahl an Messungen eine geringe Streuung auf. Die in orange dargestellte durchschnittliche Leistung ermöglichen eine bessere Einschätzung der benötigten Energiebedarfe bei gewünschten Flächenleistungen.

Der Fahrtrieb stellt als größter Verbrauch einen wichtigen Aspekt der energetischen Betrachtung dar. Die in **Abbildung 48** dargestellte exemplarische Betrachtung zeigt den Zusammenhang der durchschnittlichen Leistung des gesamten Geschwindigkeitsprofils eines Arbeitsprozesses. Hierzu wurden mehrere Testmessungen mit konstantem Füllstand durchgeführt und die Messungen mit gleichem Füllstand gemittelt.

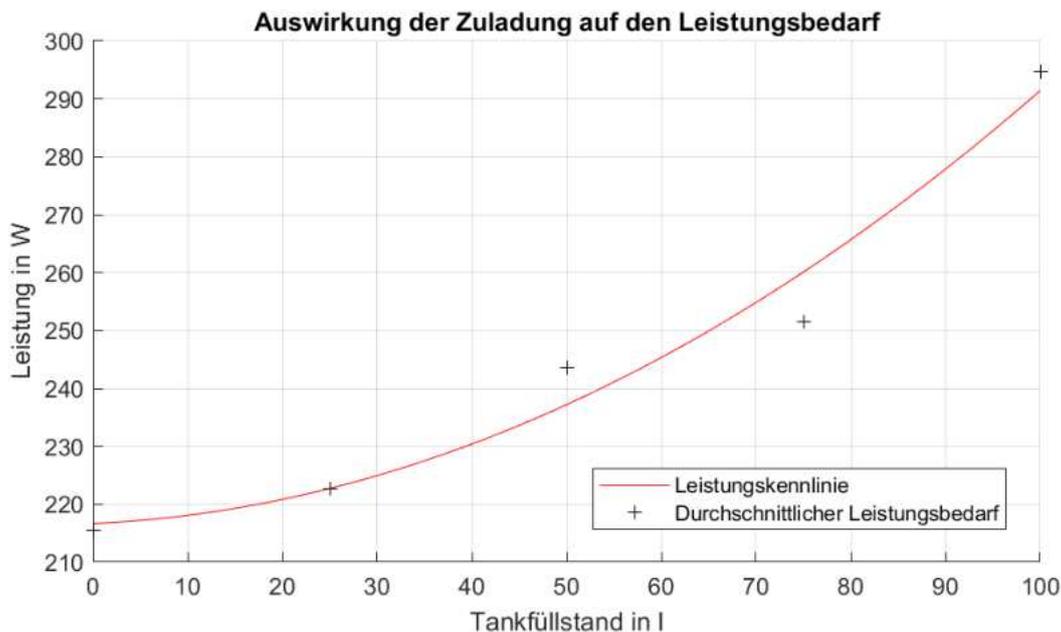


Abbildung 48: Leistungsbedarf des Fahrtriebs

Die dabei ermittelten Leistungsbedarfe dienen im Anschluss dem Erstellen der, rot eingezeichneten, Kennlinie mittels quadratischer Regression. Diese Kennlinie kann in begrenztem Maß dazu genutzt werden, um die theoretischen Leistungsbedarfe höherer Lasten zu extrapolieren. Dieses Vorgehen fließt später in die Überlegungen zur Dimensionierung einer Preisempfehlung mit ein.

Energetische Betrachtung der Versorgungsstation

Zur Validierung des Energieversorgungssystems wurden am System Belastungstests durchgeführt und ein Lastgang aufgezeichnet. Um die Kapazitäten des Systems auszureizen, wurde die Batterie der mobilen Bewässerungseinheit ausgehend von einem niedrigen Ladezustand mit einer Leistung von bis zu 2,5 kW geladen. Anschließend wurde die Stationsbatterie mit der vorhandenen solaren Leistung der PV-Anlage aufgeladen und ein erneuter Ladevorgang der mobilen Batterie durchgeführt. **Abbildung 49** stellt den entsprechenden Lastgang mit einer Regression dar. Das Laden der mobilen Batterie erfolgt gemäß dem dargestellten Diagramm im Zeitraum von 12:00 bis 15:20 Uhr. Fast im gesamten Zeitraum wird sowohl die Batterie als auch die PV-Anlage belastet. Mit einer verminderten PV-Leistung aufgrund einer vermehrten Bewölkung im Zeitraum zwischen ca. 12:15 und 14:45 Uhr wird ein großer Anteil der Leistung aus der Stationsbatterie bezogen.

Mit einer darauffolgenden Aufklärung des Himmels nimmt die solare Leistung zu, sodass in einem kurzen Zeitraum sowohl die Stationsbatterie als auch die mobile Batterie von der PV-Anlage geladen werden. Im gesamten Ladezeitraum wird die Stationsbatterie um 45% entladen, während die mobile Batterie vollgeladen wird. Nach Abschluss des Ladevorgangs wird die Stationsbatterie durch die solare

Leistung wiederaufgeladen. Dieser Prozess nimmt eine Zeit von 2:45h in Anspruch. Die Ladeleistung sinkt dabei bei klar bleibendem Himmel über die Zeit ab, da die Sonnenelevation abnimmt. Es ist zu erkennen, dass die PV-Anlage neben der Batterieladeleistung weitere Verbraucher wie Steuerungselektronik versorgt. Zusätzlich fallen Wärmeverluste über die Energiekomponenten an. Die letzten 5% werden mit einem absinkenden Strom geladen, um die Batterie zu schonen. Nach dem Ladevorgang wird die bis zu diesem Zeitpunkt wieder entleerte mobile Batterie erneut geladen und das Energiesystem belastet.

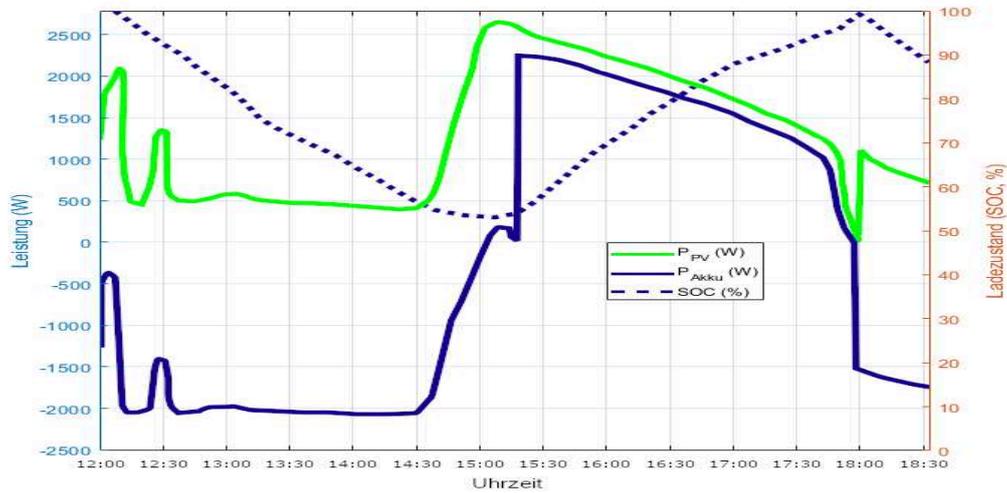


Abbildung 49: Verlauf der Lade- und Entladeleistung sowie des Batterieladezustands im Energiesystem der Versorgungsstation

Entwicklung von Praxishinweisen / Skalierungsempfehlung von Praxisanlagen 11/2023 – 8/2024

Die, über den Zeitraum des Projektes gesammelten, Erkenntnisse und Erfahrungen der Projektpartner aus technischer und agronomischer Sicht, wurden in der letzten Phase des Projektes zur Entwicklung von Praxishinweisen verwendet. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgt die Darstellung der Praxishinweise anhand einer Konzeptstudie. Aus Sicht der Projektpartner vereint das folgende Konzept die wichtigen Aspekte der Prozesspraxis. Die Konzeptstudie lief unter der Bezeichnung WaterCycle und wird im weiteren Verlauf des Kapitels genauer behandelt.

Das WaterCycle

Die Bezeichnung WaterCycle spiegelt einen elementaren Aspekt des Konzeptfahrzeuges wider. Dies bezieht sich auf den Begriff „Cycle“, welcher in Anlehnung an die zweirädrige Bauweise des WaterCycles gewählt wurde. Denn im genaueren besteht das in **Abbildung 50** dargestellte WaterCycle aus zwei quasi identischen Einspurfahrzeugen. Die einzigen Unterschiede liegen hier in der gespiegelten Geometrie und dem Umfang der Sensorik sowie Bedientechnik. Zwecks Kostenreduzierung und Bedienbarkeit befindet sich nur in einem der beiden Fahrzeuge eine Bedienschnittstelle und ein GNSS-RTK-System.



Abbildung 50: Das Konzept WaterCycle

Das Konzeptfahrzeuges besteht somit aus zwei Einzelfahrzeugen, welche zunächst unabhängig voneinander agieren könnten. Erst die Verbindungsstreben auf der Oberseite des Fahrzeuges macht aus den beiden Komponenten eine Einheit. Die so entstandene Erscheinungsform leitet sich aus der Überlegung ab, wie es möglich ist auch durch hoch gewachsene Reihenkulturen zu manövrieren und trotzdem eine praxisfähige Wassermenge mitzuführen. Erreicht wurde dies durch Verbauen eines mittig liegenden Tanks. Da die Breite des Fahrzeuges durch den Reihenabstand limitiert ist, lässt sich die Tankgröße durch die Fahrzeughöhe und -länge skalieren. Um die hohen auftretenden Gewichtslasten so wenig wie möglich zu steigern, kommt zur Realisierung der Grundkonstruktion ein Gitterrohrrahmen zum Einsatz. Dies ermöglicht ein gutes Verhältnis zwischen Eigengewicht und Stabilität. Der Antrieb erfolgt über Elektromotoren, welche über ein Batteriesystem versorgt werden. Gleiches gilt für die Lenkung, welche es ermöglicht jedes Rad einzeln auszurichten. Die Bewässerung erfolgt während der Reihendurchfahrt über einen Bewässerungsapparat an der Unterseite der Einspurfahrzeuge.

Die Reihendurchfahrt selbst leistet ebenfalls einen großen Beitrag zum Erscheinungsbild des Konzeptfahrzeuges. Um auch hochgewachsene Reihenkulturen bearbeiten zu können, fahren die beiden Einspurfahrzeuge in den Zwischenräumen der Pflanzenreihen. Eine schematische Darstellung ist auf der linken Seite von **Abbildung 51** zu erkennen. Zusehen ist hier die Vorderansicht des WaterCycles. Die auf dem Boden eingezeichneten grünen Linien deuten die Pflanzenreihen an. Wie zu erkennen ist, wird die mittlere Reihe übersprungen. Dies bietet den Vorteil, dass bei einer Reihendurchfahrt vier Reihen auf einmal bewässert werden.

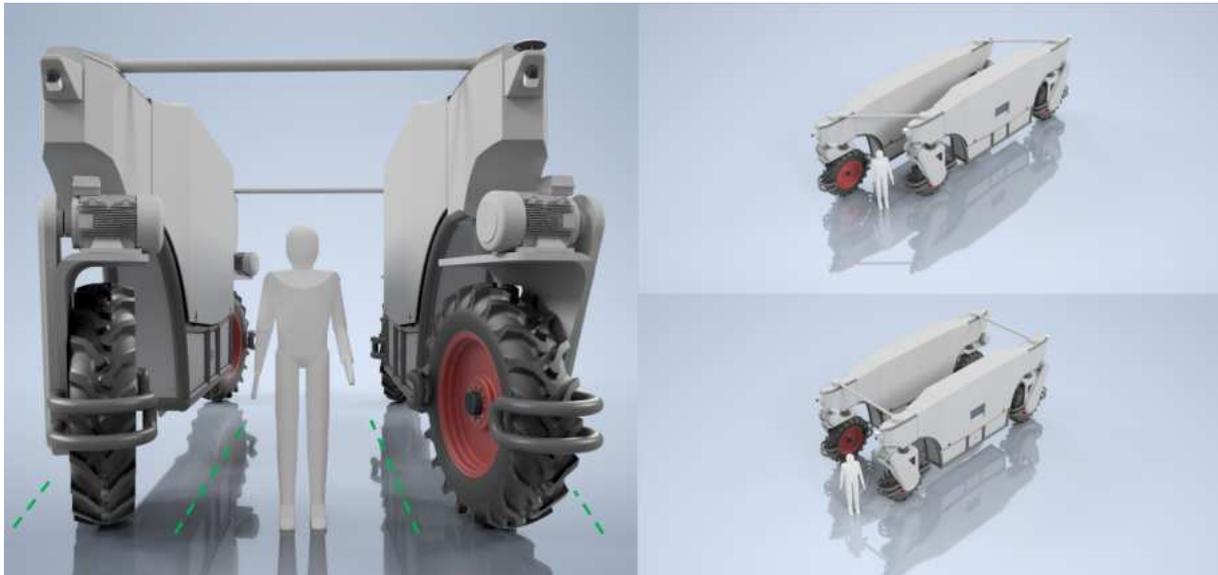


Abbildung 51: Die Arbeitspositionen des WaterCycles

(links: Vorderansicht Reihendurchfahrt, rechts oben: mit Längsversatz, rechts unten: ohne Längsversatz)

Da die Arbeitsbreite über den Reihenabstand vorgegeben ist musste die Fahrzeugbreite variabel gestaltet werden. Aus diesem Grunde wurden die Querstreben, welche zunächst der Stabilität dienen, drehbar an den beiden Fahrzeugseiten befestigt. Durch ungleiches Verfahren lässt sich so ein Längsversatz der beiden Einspurfahrzeuge erzielen. Als Folge dessen ändert sich auch der Abstand der beiden Fahrzeuge zueinander. Dies führt wiederum zu einer kleineren Arbeitsbreite. Mögliche Varianten des Vorganges lassen sich den beiden Darstellungen auf der rechten Seite von **Abbildung 51** entnehmen. Die Variabilität der Arbeitsbreite ist somit nur durch die Länge der Querstrebe und die Breite des Einspurfahrzeuges limitiert.

Einer der wichtigsten Aspekte des Konzeptes ist der Bewässerungsapparat des WaterCycles. Dieser ist der ausschlaggebende Faktor für die Bewässerungseffizienz während der Ausbringung. Bei der Konzeptionierung wurde in erster Linie auf die Auswirkungen der Wasserressourcenschonung, Prozess Adaptivität und der Arbeitsgeschwindigkeit geachtet. Resultat der Konzeptionierung sind die, auf **Abbildung 52** dargestellten, Düsenbalken an der Unterseite jedes Fahrzeugteiles. Die dargestellten Düsen sind jeweils mit einem abschaltbaren Ventil versehen. Das Ventil ermöglicht das gezielte ein und abschalten der Wasserdüsen. Auf diese Weise ist eine Einzelpflanzenbewässerung möglich in dem die Düsen in den Pflanzenzwischenräumen abgeschaltet werden. Die direkte Anbringung des Ventiles an die Düse führt zusätzlich dazu, dass keine nennenswerten Restmengen zwischen Ventil und Düse die Effizienz des Aufbaus senken. Um eine ausreichende Menge Wasser an die Pflanze zu bringen, würden bei Einzelpflanzenbewässerung mit nur einer Düse große Volumenströme benötigt. Solche Volumenströme führen auf Grund ihrer Geschwindigkeit zu starken Erosionen. Um solche Schäden zu vermeiden, wurde eine Vielzahl an Düsen eingesetzt. Durch die Verwendung eines solchen Düsenbalkens sinkt die Wassermenge pro Düse, was zunächst dem benötigten Volumenstrom und im

Endeffekt der Arbeitsgeschwindigkeit zugutekommt. Um die Ausbringung auch prozessadaptiv zu ermöglichen, wurde der Düsenbalken mit einem kleinen Schrittmotor versehen. So ist für eine Vielzahl an Pflanzenkultur eine passende Ausrichtung einstellbar.

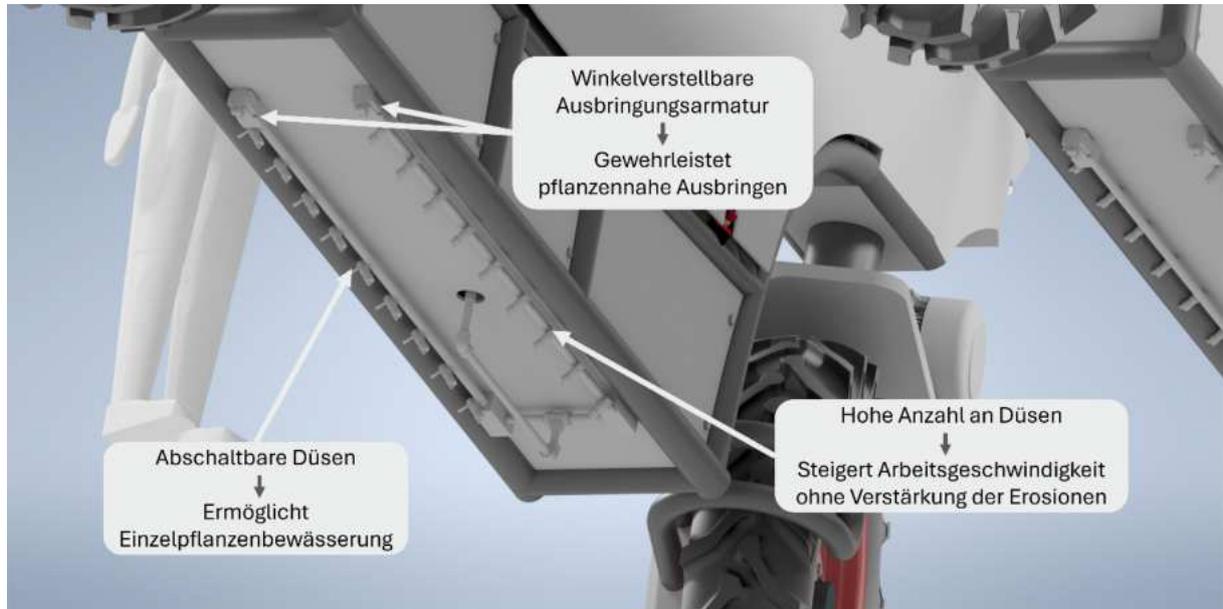


Abbildung 52: Der Bewässerungsapparat des WaterCycles

Mögliche Auslegung

Um einen besseren Eindruck für mögliche Dimensionen zu erhalten, wurde auf Grundlage des WaterCycle Konzeptes eine modellbasierte Prozessprognose durchgeführt. Die hierzu benötigten Größen der Prozessparameter entstammen Fachliteratur, welche durch die empirischen Daten der Versuche ergänzt wurden.

Die Feldfläche der hochskalierten Prozessgröße beträgt in diesem Beispiel 3 ha bei einem Reihenabstand von 75 cm. Die auszubringende Wassermenge wurde für den gesamten Prozess auf 12,5 l/m² festgelegt und erfolgt bei einer Geschwindigkeit von 5 km/h. Der Transport zwischen Feld und Station wird mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h angenommen. Im Falle dieses Prozesses erhält man einen Gesamtenergiebedarf von ~56,5 kWh sowie eine Wassermenge von 25.000 l. Um diesen Prozess gut darstellen zu können, wurden die Dimensionen des WaterCycles wie in **Abbildung 53** darstellt angenommen.

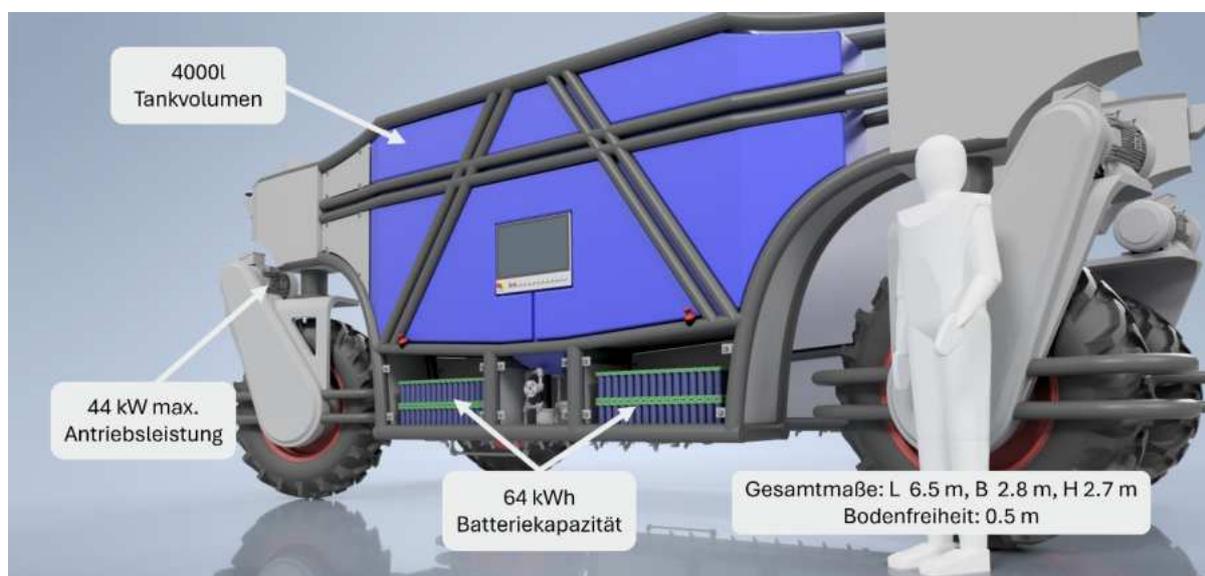


Abbildung 53: Mögliche Dimensionierung des WaterCycles

Auf Grundlage dieser Dimensionen können Prozessdauern von ~6,35 h erwartet werden. Das Gesamttankvolumen von 4000 l (2000 l pro Fahrzeughälfte) beschränkt die benötigten Tankvorgänge auf 7. Die Batteriekapazität von 64 kWh erlaubt es den gesamten Prozess mit einer einkalkulierten Sicherheit darzustellen. So würden keine Ladevorgänge während des Arbeitsprozesses benötigt, was sich positiv auf die Prozessdauer auswirkt. Auch die 11 kW Antriebsleistung pro Rad sollten für eine Vielzahl an Prozessen ausreichen und genügend Reserven bieten. Unter Angesicht der bestimmten Konzeptparameter kommt man bei einer gewünschten Bodenfreiheit von 0,5 m auf die genannten Gesamtdimensionen von Länge 6,5 m, Breite 2,8 m und Höhe 2,7 m.

Die Projektpartner sind der Ansicht, dass das WaterCycle eine gute Grundlage für die Entwicklung einer praxisfähigen Bewässerungsmethode bietet. Die genannten Dimensionen stellen eine gute Ausgangslage möglicher Machbarkeitsstudien dar. Auch das Erscheinungsbild deckt alle wichtigen Prozessaspekte ab.

Agronomische Erkenntnisse der aktuellen Bewässerungspraxis

Die agronomischen Erkenntnisse der aktuellen Bewässerungspraxis, basierend auf dem Bericht der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Kulturartspezifische Zusatzwasserbedarfe

- **Klimatische Verhältnisse:** Die klimatische Wasserbilanz (KWB) ist entscheidend für den Zusatzwasserbedarf. Eine negative KWB im Sommerhalbjahr (April bis September) erfordert oft zusätzliche Bewässerung.
- **Kulturart:** Unterschiedliche Kulturarten haben variierende Wasserbedarfe, abhängig von Entwicklungsstadien und Physiologie. Durchschnittlich benötigen Pflanzenbestände in Deutschland 3-4 mm Wasser pro Tag von Mai bis August. Der Wasserbedarf variiert stark je nach Entwicklungsstadium der Pflanzen. Besonders empfindlich sind Pflanzen während der Blüte und der Fruchtbildung.
- **Bodenart:** Sandböden haben eine geringere Wasserspeicherfähigkeit als Lehmböden, was zu einem höheren Zusatzwasserbedarf führt. Die Bodenfeuchte sollte regelmäßig überwacht werden, um den optimalen Zeitpunkt für die Bewässerung zu bestimmen. Zu häufige oder zu seltene Bewässerung kann den Pflanzen schaden. Der Einsatz moderner Technologien wie Sensoren zur Bodenfeuchtemessung und automatisierte Bewässerungssysteme kann die Effizienz der Bewässerung erheblich steigern.

2. Exemplarische Versuchsergebnisse

- **Mais:** Der höchste Bewässerungsbedarf besteht in den Monaten Juli und August. Die Berechnungsmengen variieren stark, abhängig von den klimatischen Bedingungen.
- **Kartoffeln:** Hauptbewässerungsmonate sind Juni und Juli. Der Wasserbedarf ist besonders hoch während der Knollenanlage bis zur Krautabreife.
- **Zuckerrüben:** Der höchste Bewässerungsbedarf besteht ab dem Reihenschluss bis Ende September. Trockenstress sollte vermieden werden, um den Zuckergehalt zu sichern.

3. Vergleichende Bewertung von Bewässerungsstrategien

- **Einsatz der Bewässerung:** Der richtige Zeitpunkt und die Gabenhöhe sind entscheidend. Methoden wie die Geisenheimer Bewässerungssteuerung helfen bei der Entscheidung.
- **Technik:** Unterschiedliche Bewässerungstechniken (z.B. mobile Beregnungsmaschinen, Tropfbewässerung) haben verschiedene Energie- und Wassereffizienzen. Die Wahl der Bewässerungstechnik hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch. Techniken mit niedrigem Druckbedarf sind energieeffizienter und umweltfreundlicher.

4. Energieverbrauch der Beregnungstechnik

- **Mobile Beregnungsmaschinen:** Hoher Energiebedarf (7-9 bar Druck). Effizientere Alternativen sind Düsenwagen und Kreisberegnung.
- **Tropfbewässerung:** Sehr energieeffizient (unter 2 bar Druck) und wassersparend.

5. Anforderungen an künftige Bewässerungsstrategien

- Gesetzliche Grundlagen: Jede Wasserentnahme ist genehmigungspflichtig. Die erlaubte Wassermenge ist limitiert und muss dokumentiert werden.
- Einschränkungen: In Trockenjahren gibt es zeitliche Einschränkungen für die Bewässerung, um Wasser effizienter zu nutzen.

Diese Erkenntnisse bieten eine umfassende Grundlage für die Optimierung der Bewässerungspraxis in der Landwirtschaft, um sowohl die Erträge zu sichern als auch die Ressourceneffizienz zu verbessern.

2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen

Das Vorhaben der OG *WaterWise* steht im vollen Einklang sowohl mit den EIP- als auch den niedersächsischen Zielen gemäß Projektauftrag. Es fokussiert auf den thematischen Schwerpunkt „Weiterentwicklung von wettbewerbsfähigem Ackerbau, Grünland- und Dauerkulturbewirtschaftungssystemen.“ Die OG *WaterWise* hat einen Beitrag rund um Fragestellungen der effizienten Bewässerung geleistet.

Bezugnehmend auf die EIP-Ziele nach Nr. 1.3 der EIP-Richtlinie bezieht sich die OG *WaterWise* auf die:

- Weiterentwicklung von wettbewerbsfähigem Ackerbau, Grünland- und Dauerkulturbewirtschaftungssystemen für ein Ressourcen schonendes und effizientes Nährstoff- und Pflanzenschutzmanagement im konventionellen und ökologischen Landbau.

Mit Bezug zu den thematischen Schwerpunkten auf Landesebene werden die Handlungsfelder Bioökonomie sowie Umwelt und Natur fokussiert die OG auf die operativen Ziele:

- Handlungsfeld Bioökonomie – Zukunftssicherung Bioökonomie u.a. durch nachhaltigen Ausgleich von Ökologie und Ökonomie - Maßnahmen zur Ressourceneffizienz in der gesamten Wertschöpfungskette
- Handlungsfeld Umwelt und Natur – Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels, Senkung des CO₂-Ausstoßes und Schutz der natürlichen Ressourcen Wasser, Boden und der Naturräume - Unterstützung von Forschungsvorhaben nasser Bewirtschaftungsverfahren sowie Ausbau und Weiterentwicklung der FuE – Kapazitäten in der Wasserwirtschaft unter gleichzeitiger Profilierung der Region als wasserwirtschaftlicher Innovationsstandort, einschließlich Erarbeitung von Maßnahmen des Grundwasserschutzes und Förderung neuer Konzepte im Bereich des Grundwasser- und Abwassermanagements

2.4.5 Nebenergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Unterauftrag an die LWK Niedersachsen vergeben. Inhaltlich ging es um Fragestellungen rund um die Praktikabilität und Ökonomie zukünftiger Bewässerungssysteme und Bewertung aktueller rechtlicher Rahmenbedingungen. Entstanden ist eine umfassende Zusammenstellung. Daraus und aus den Vorhaben *Waterwise* lassen sich die Anforderungen an ein zukunftsorientiertes Bewässerungssystem ableiten. Ein solches System sollte folgende Merkmale aufweisen:

1. Effiziente Wassernutzung

- Klimatische Anpassung: Nutzung von Wetterdaten und klimatischen Wasserbilanzen zur präzisen Steuerung der Bewässerung. Systeme sollten in der Lage sein, sich an wechselnde klimatische Bedingungen anzupassen.
- Bedarfsgerechte Bewässerung: Einsatz von Sensoren zur Messung der Bodenfeuchte und zur Bestimmung des genauen Wasserbedarfs der Pflanzen. Dies verhindert Über- oder Unterbewässerung.

2. Technologische Innovationen

- Automatisierte Systeme: Integration von automatisierten Bewässerungssystemen, die auf Echtzeitdaten basieren und den Wasserbedarf kontinuierlich überwachen und anpassen.
- Pflanzenbezogene Bewässerung: Förderung der Pflanzenbezogenen Bewässerung, da sie sehr energieeffizient ist und Wasser direkt an die Wurzeln der Pflanzen liefert, wodurch Verdunstungsverluste minimiert werden.

3. Energieeffizienz

- Niedriger Energieverbrauch: Einsatz von Technologien, die mit geringem Druck arbeiten, wie z.B. Tropfbewässerungssysteme, um den Energieverbrauch zu reduzieren.
- Erneuerbare Energien: Nutzung von Solar- oder Windenergie zur Stromversorgung der Bewässerungssysteme, um die Nachhaltigkeit zu erhöhen.

4. Flexibilität und Anpassungsfähigkeit

- Modulare Systeme: Entwicklung modularer Bewässerungssysteme, die leicht an verschiedene Feldgrößen und -formen angepasst werden können.
- Mobile Einheiten: Einsatz von mobilen Beregnungsmaschinen, die flexibel auf verschiedenen Feldern eingesetzt werden können.

5. Rechtliche und organisatorische Rahmenbedingungen

- Genehmigungsprozesse: Nachvollziehbare Genehmigungsprozesse für die Wasserentnahme und klare Regelungen zur Wassernutzung.
- Dokumentation und Überwachung: Einführung von Systemen zur genauen Dokumentation der Wasserentnahme und -nutzung, um die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben sicherzustellen.

6. Bildung und Beratung

- Schulungen: Bereitstellung von Schulungen und Beratungsdiensten für Landwirte zur optimalen Nutzung der Bewässerungstechnologien.
- Digitale Plattformen: Entwicklung von Apps und Online-Plattformen zur Unterstützung der Bewässerungssteuerung und zur Bereitstellung aktueller Wetter- und Bodenfeuchtedaten.

7. Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit

- **Wasserspeicherung:** Bau von Speichersystemen wie Teichen oder Zisternen, um Regenwasser zu sammeln und in Trockenperioden zu nutzen.
- **Bodenverbesserung:** Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur und -speicherfähigkeit, um die Effizienz der Bewässerung zu erhöhen.

Ein solches Bewässerungssystem würde nicht nur den Wasserverbrauch optimieren und die Erträge sichern, sondern auch die Umwelt schonen und die Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft fördern.

Optimierung der induktiven Ladeschnittstelle des Roboters

Für die Durchführung des hochautomatisierten Betriebs während der Feldversuche wurde ein induktives Ladesystem mit einer Ladeleistung von bis zu 1 kW erworben. Mit einer empfohlenen Ladeleistung der mobilen Batterie von 2.7 kW nutzt diese Lösung hinsichtlich der Ladedauer das volle Potential nicht aus. Die problematische Zugänglichkeit sowie der hohe Preis von vergleichbaren Plug-and-Play-Lösungen im gewünschten Leistungsbereich bedingten den Kompromiss, ein System mit reduzierter Leistung zu erwerben. Für den Betrieb während der Feldtests reichte die Ladeleistung des gewählten Systems aus. Im Hinblick auf die Vision eines Schwarmverhaltens unter der Verwendung mehrerer mobiler Bewässerungseinheiten wäre die vorhandene Leistung jedoch unterdimensioniert. In diesem Zuge wurde eine Betrachtung zur Auslegung eines neuen, an die speziellen Anforderungen angepassten, induktiven Ladesystems durchgeführt. Ein Augenmerk fiel dabei auf die bidirektionale Energieübertragung für die Gewährleistung der Nutzbarkeit der mobilen Plattformen auch außerhalb von Bewässerungszeiträumen. Die Vision geht davon aus, dass die Plattformen als Energiespeicher genutzt werden können, um beispielsweise Lastspitzen im landwirtschaftlichen Betrieb kompensieren zu können. In diesem Kontext wurde eine Auslegungsmethodik erarbeitet und es entstand ein modellbasiertes Auslegungswerkzeug. Die Auslegungsmethodik wurde angewandt, konnte jedoch nicht vollständig abgeschlossen werden, da die Untersuchung verschiedener realisierbarer Geometrien von Übertragungsspulen einen hohen zeitlichen Aufwand mit sich bringt. Für Folgearbeiten zur weiteren Auslegung wurde ein Prüfstand aufgebaut, anhand dessen geeignete Auslegungskonfigurationen getestet werden können.

2.4.6 Arbeiten, die zu keiner Lösung/zu keinem Ergebnis geführt haben

Im Rahmen der dritten Feldversuch Phase wurden Betrachtungen angestellt, inwieweit eine Einzelpflanzenbewässerung mit dem aktuellen Aufbau der Bewässerungseinheit möglich ist. Die hier angestellten Bemühungen zeigten jedoch, dass es ohne notwendige Hard- und Softwareerweiterung nicht möglich ist einen solchen Arbeitsprozess effizient zu realisieren. Die Versuche wurden daher eingestellt und die nötigen Änderungen in der Konzeptskalierung eingearbeitet.

Eine weitere technische Schwierigkeit betrifft das anfangs aufgestellte Konzept der Betankung über die Schwerkraft mit der Dosierung der Wassermenge über ein Ventil. Es hat sich während der Tests gezeigt, dass das gewählte Betankungskonzept für eine Dosierbarkeit nicht geeignet ist, da das Ventil eine zu lange Schließzeit aufweist. Zudem muss das Ventil über eine längere Zeit geöffnet sein, um die nötige Stellenergie für den Schließvorgang gewährleisten zu können. Bei der Verwendung eines Ventils ist das Spannungslose schließen eine Grundvoraussetzung für den sicheren Betrieb. Da auf dem Markt zeitnah keine wirtschaftlich günstigen Alternativen mit einem vergleichbaren Durchfluss und einer schnelleren Schließzeit gefunden werden konnten, wurde beschlossen eine Tauchpumpe in den Tank

einzulassen und diese zur Betankung zu verwenden. Die kostengünstige Alternative konnte zeitnah verbaut werden, sodass die Tests nahtlos anschließen konnten. Mit der Tauchpumpe konnte die Funktionalität der Dosierbarkeit nachgewiesen werden.

2.4.7 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern

Die Arbeiten sollen mit dem Ziel fortgeführt werden, die wirtschaftliche Verwertung zu ermöglichen und die begonnen wissenschaftlichen Projekte erfolgreich zum Abschluss zu bringen. Dafür werden der Container, die PV-Anlage, der Energiespeicher, das Ladesystem, der Wasserspeicher, der Roboter und die Systemtechnik für die Navigation weiter eingesetzt. Das Versuchsfeld wird erweitert und für die Weiterentwicklung und andere Versuche genutzt.

2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Während der Projektlaufzeit sind einige verwertbare Technologien, Verfahren und Empfehlungen entstanden. Die wichtigsten Punkte umfassen folgende Aspekte.

Die umfangreiche **Spurplanungsalgorithmik** kann durch kleine Änderungen auch für weitere Aufbauten und Projekte genutzt werden. Durch das Nutzen von vorgegeben Navigationsposen und definieren besonderer Zonen sowie ihrer Vorgaben (z.B. Sicherheitszone, senken der Geschwindigkeit) lassen sich eine Vielzahl von Navigation Prozessen darstellen.

Ein zusätzlicher Aspekt ist die **Steuer- und Regellogik des Tankvorganges**. Die hier verwendeten Logiken lassen sich auf weiteren Medien als nur Wasser anwenden. So wäre es in anderen Prozessen möglich bspw. Schüttgüter nach einem vergleichbaren Vorgehen zu verladen.

Selbes gilt für die **Tourenoptimierung** der mobilen Bewässerungseinheit. Durch Anpassen der Bewässerungsparameter durch äquivalente Parameter eines alternativen Arbeitsprozesses (z.B. für Streugüter), wäre es möglich auch hier das Optimierungsproblem zu bearbeiten.

Die Umsetzung der **Ladeschnittstelle** ist ein weiter Aspekt, welcher auch für weitere Roboteraufbauten verwendet werden könnte. Solange eine vergleichbare Schnittstelle und Energieversorgung geben ist, ließe sich auch diese Logik für weitere Praxisfälle adaptieren.

Um in weiteren Praxis Anwendungen das Ausbringen von flüssigen Medien zu ermöglichen, könnte hier die **Pumpenregelung** verwendet werden. Die Pumpenregelung des Versuchsaufbaus umfasst zusätzlich zu dem direkten Regeln des Volumenstroms auch eine Geschwindigkeitsanpassung, um die gewünschten Flächenleistung zu realisieren.

Die **Logik des internen Energiemanagements** ließe sich bei einem vergleichbaren Aufbau ebenfalls auf andere Konzepte übertragen. Insbesondere das Ermöglichen eines Standby mit dedizierter Batterie und der Möglichkeit des vollständigen Hochfahrens bei Bedarf, kann für ein Vielzahl an technischen Systemen nützlich sein.

Es gibt eine Vielzahl an mobilen Roboterkonzepten, welche über GNSS-Daten einem vordefinierten Pfad folgen sollen. Für solche Anwendungen kann das Verwenden der eingesetzten **Fahrspurregelung** von Nutzen sein. Die zunächst recht simple Grundidee, kann hier durch Steigern der Komplexität des Reglers auf eine vergleichbare Regelgüte optimiert werden.

2.6 Verwertung und Nutzung der Ergebnisse

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Ergebnisse wurden und werden über verschiedene Kommunikationskanäle kommuniziert.

Darüber hinaus nutzen die einzelnen OG Mitglieder die Ergebnisse in Folgeprojekten.

Insbesondere die gewonnenen Querschnittsergebnisse bilden die Grundlage für aktuelle und zukünftige Forschungsarbeiten. Wesentliche Querschnittsergebnisse sind in diesem Zusammenhang:

- die Tourenoptimierung; mit einer Verallgemeinerung der hier entwickelten Algorithmen, ergibt sich die Basis für eine Infield - Routenplanung hochautomatisierter Landmaschinen.
- die Spurplanung; hier wurde ein allgemeingültiger Ansatz für das Abfahren vorgegebener Routen entwickelt.
- die Fahrspurregelung; es wurde ein robuster Regler entwickelt, der grundsätzlich für alle Landmaschinen geeignet ist, allerdings ist hierfür Einbindung weiterer Fahrwerkskonzepte erforderlich.

Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Ergebnisse nutzt das OG-Mitglied Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. (NAN) als wichtigen Baustein im Themenfeld Wasser und Bewässerungslandwirtschaft. Im fortlaufenden Austausch werden Fragen zur Robotik und zur autonomen Bewässerung weiter diskutiert. Dabei werden die Erkenntnisse aufgegriffen, insbesondere vor dem Hintergrund zunehmender Einschränkungen in der Wassernutzung. Diese Problematik rückt immer stärker in den Fokus und erfordert innovative Lösungsansätze.

2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Eine wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist durch das vorgestellte WaterCycle-Konzept gegeben. Das Konzept zeigt, dass sich die modellhaften Ergebnisse aus dem *WaterWise* Projekt auch in einen praxisrelevanten und damit wirtschaftlichen Maßstab übertragen (skalieren) lassen. Dies gilt selbstverständlich nur vorbehaltlich der Validierung eines Prototyps.

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich in zweierlei Hinsicht. Zum einen stellen die Querschnittsergebnisse eine gute Grundlage für andere Forschungsarbeiten im Kontext der Hochautomatisierung von Landmaschinen da (vgl. Kap. 2.6). Zum anderen kann das erfolgreiche Setting des Projektes *WaterWise* (Modellmaßstab) eine Blaupause für Forschungsprojekte sein, bei denen ein praxisgerechter Maßstab und die damit verbundenen Kosten in keinem Verhältnis zu den Projektrisiken stehen. Ein konkretes Beispiel ist hier das EIP-Projekt „AgriPV FieldGarden“.

2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Für die Kommunikation der Durchführung des Vorhabens *WaterWise* sowie der erzielten Erkenntnisse wurden unterschiedliche Wege genutzt. Über die Homepage der Hochschule Osnabrück <https://www.hs-osnabrueck.de/waterwise-asba/> wurden und werden die grundsätzlichen Ideen des Vorhabens kommuniziert. Darüber hinaus wurden die Akteure vorgestellt. Die Mitglieder der OG haben auf ihren Internetseiten auf diese Unterseite der Hochschule Osnabrück verlinkt, so dass ein zentraler Anlauf existiert, der auch über das Projekt weiter genutzt werden soll.

Das NAN ([Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V.](#)) hat auf seiner Website das Projekt vorgestellt und Projektergebnisse über den Newsletter des NAN an knapp 1.000 Akteure der Agrarbranche in Niedersachsen kommuniziert. Die Ergebnisse des Projekts wurden abschließend in einem Fachgespräch präsentiert. Nach Projektende werden sie der Öffentlichkeit über die Website der Deutschen Vernetzungsstelle Ländliche Räume (DVS) zur Verfügung gestellt. Auch nach Projektabschluss wird die Kommunikation des Projektes fortgesetzt.

Darüber hinaus gibt es weitere Kommunikationswege, die im Folgenden aufgeführt sind:

Wissenschaftliche Publikationen

- Masterthesis:
 - Entwicklung eines effizienten Routenplanungsverfahrens für einen Bewässerungsroboter in Reihenkulturen, Lars Pelkmann
- Masterthesis:
 - Simulationsgestützte Entwicklung und Aufbau eines induktiven Ladesystems, Vladimir Brunstein

Veranstaltungen

- Vorstellung des Vorhabens *WaterWise* im Rahmen einer Deutsch-Niederländischen Delegationsreise im Mai 2022 auf dem Hof Fleming
- Vorstellung des Vorhabens im Rahmen eines Besuchs von Staatssekretär für Digitalisierung a.D. Stefan Muhle und Landrat Johann Wimberg im August 2022 auf dem Hof Fleming
- Vorstellung des Vorhabens im Rahmen eines Besuchs des Studienseminars Osnabrück – Bereich Agrarwirtschaft im August 2022
- Vorstellung des Vorhabens im Rahmen des Besuchs einer Studiengruppe der Universität Osnabrück im Juli 2023. In einem Vortrag wurde das Konzept erläutert und im Rahmen einer praktischen Vorführung der Roboter auf dem Feld gezeigt.
- Vorstellung des Vorhabens *WaterWise* im Rahmen der Sommerreise 2023 der Landwirtschaftsministerin Miriam Staudte im Juli 2023. Prof. Dr. Johanning hat die Ministerin stellv. für das Konsortium über das Projekt informiert. Im Rahmen einer Vorführung konnte der Roboter selbsttätig Wasser tanken und dann entsprechend der geplanten Vorgaben Maispflanzen bewässern. Im Gespräch mit der Ministerin und den anwesenden Gästen ging Prof. Dr. Johanning umfassend auf die bisherigen Entwicklungsschritte ein, stellte den Status quo vor und gab einen Ausblick für die nächsten Monate. In einer abschließenden Diskussion wurde das Konzept konstruktiv kritisch bewertet.



Abbildung 54: „Gezielte sparsame Bewässerung mit einem Robotiksystem:
Bernd Johanning demonstriert Ministerin Miriam Staudte
auf dem Hof Fleming in Lönigen das Projekt *WaterWise-ASBA*“
Textquelle: ML, Bildquelle: ML/ Timo Jaworr

- Vorstellung des Vorhabens *WaterWise* im Rahmen einer Veranstaltung im Oktober 2023 mit 40 Fachschülerinnen und Fachschülern der Justus von Liebig Schule vorgestellt und kritisch diskutiert.
- Vorstellung des Vorhabens *WaterWise* im Rahmen eines Besuchs der Landwirtschaftlichen Rentenbank mit namhaften VC-Gebern im Oktober 2023.



Abbildung 55: Gespräch mit Vertreterinnen und Vertretern der Landwirtschaftlichen Rentenbank sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern namhafter VC-Gesellschaften

- Diskussion der Ergebnisse im Projekt *WaterWise* im Rahmen eines vom NAN und Hof Fleming organisierten Fachgespräches am 2. August 2024. Die Ergebnisse wurden auf der Website des NAN veröffentlicht.

[\(https://netzwerk-ackerbau.de/innovationen-in-der-bewasserungstechnik-fachgesprach-auf-hof-fleming/\)](https://netzwerk-ackerbau.de/innovationen-in-der-bewasserungstechnik-fachgesprach-auf-hof-fleming/).

Vorträge

- Am 04. April 2023 wurde das Vorhaben *WaterWise* im Rahmen einer Online-Veranstaltung zum Thema Klimaanpassung in der Land- und Forstwirtschaft vorgestellt. Die Veranstaltung wurde seitens des Niedersächsischen Kompetenzzentrums Klimawandel (NIKO) und Niedersächsisches Innovationszentrum Niedersachsen GmbH durchgeführt. In der Diskussion mit den Anwesenden konnten wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung des Vorhabens gewonnen werden.
- Am 31. Mai 2024 wurde das Vorhaben *WaterWise* im Rahmen der Tagung “Bewässerung im Ackerbau – Herausforderungen und Potentiale von Innovationen” des Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e. V. in Suderburg vorgestellt. Während der Veranstaltung ergaben sich für das Projekt *WaterWise* durch die Vernetzung mit landwirtschaftlichen Betrieben, die große Teile ihrer Flächen bewässern und weiteren relevanten Akteuren aus der landwirtschaftlichen Bewässerungsszene wesentliche Anregungen. Die Ergebnisse der Tagung wurden auf der Website des NAN veröffentlicht (<https://netzwerk-ackerbau.de/ruckblick-bewasserung-im-ackerbau/>)

3 Literaturverzeichnis

- ANavS. (2024). *ANavS*. Von Multi-Sensor RTK/PPP Module: <https://anavs.com/products/msrtk/> abgerufen
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (2008). *Projektförderung*. Von Autonomer Feldroboter zum Einzelpflanzen-basierten Versuchswesen (BoniRob): https://service.ble.de/ptdb/index2.php?detail_id=49989&ssk=5123229d68&site_key=293&stichw=BoniRob&zeilenzahl_zaeahler=9#newContent abgerufen
- dSpace. (2024). *dSpace*. Von MicroAutoBox II: <https://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/micautob/microautobox2.cfm> abgerufen
- Fendt. (2020). *Fendt*. Von Neuste Generation von Säroboter: Der Fendt Xaver wird erwachsen: <https://www.fendt.com/de/2-fendt-xaver> abgerufen
- Naio. (2024). *Naio Technologies*. Von Oz: <https://www.naio-technologies.com/en/oz/> abgerufen
- Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, A. V. (April 2022). *Die Strategie Niedersachsens zur Künstlichen Intelligenz*. Abgerufen am Februar 2023 von https://www.stk.niedersachsen.de/download/183511/Anlage_KI-Strategie_Niedersachsen.pdf
- Stierle, S. (29. 06 2022). *Digital Farming: Chancen, Hoffnungen und Ernüchterung*. Abgerufen am 02 2023 von <https://background.tagesspiegel.de/digitalisierung/digital-farming-chancen-hoffnungen-und-ernuechterung>

Anhang A – Schematische Darstellung des konzipierten Energiesystems

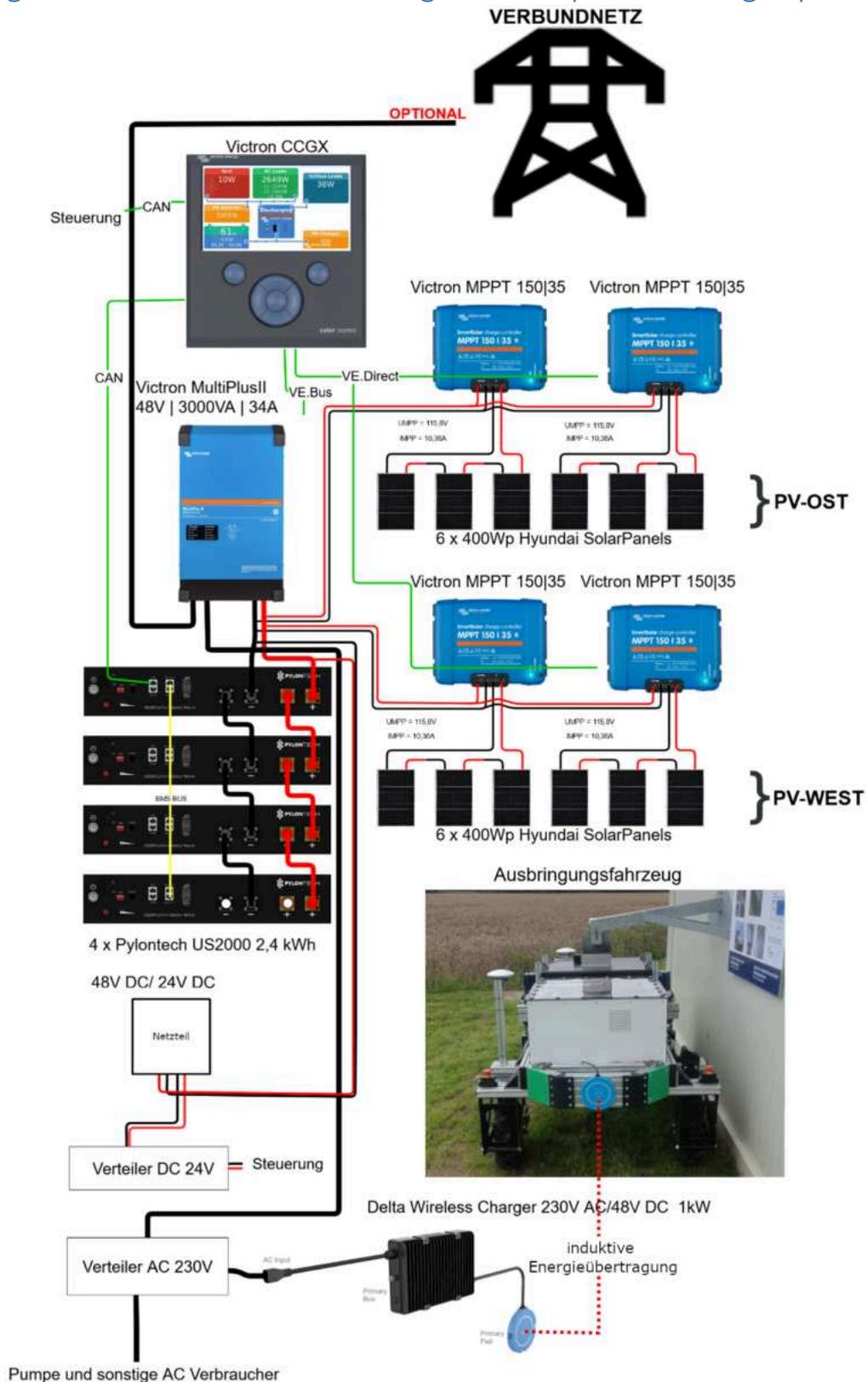


Abbildung 56: Schematische Darstellung des Energiesystems

Anhang B – Roboter Netzwerktopologie

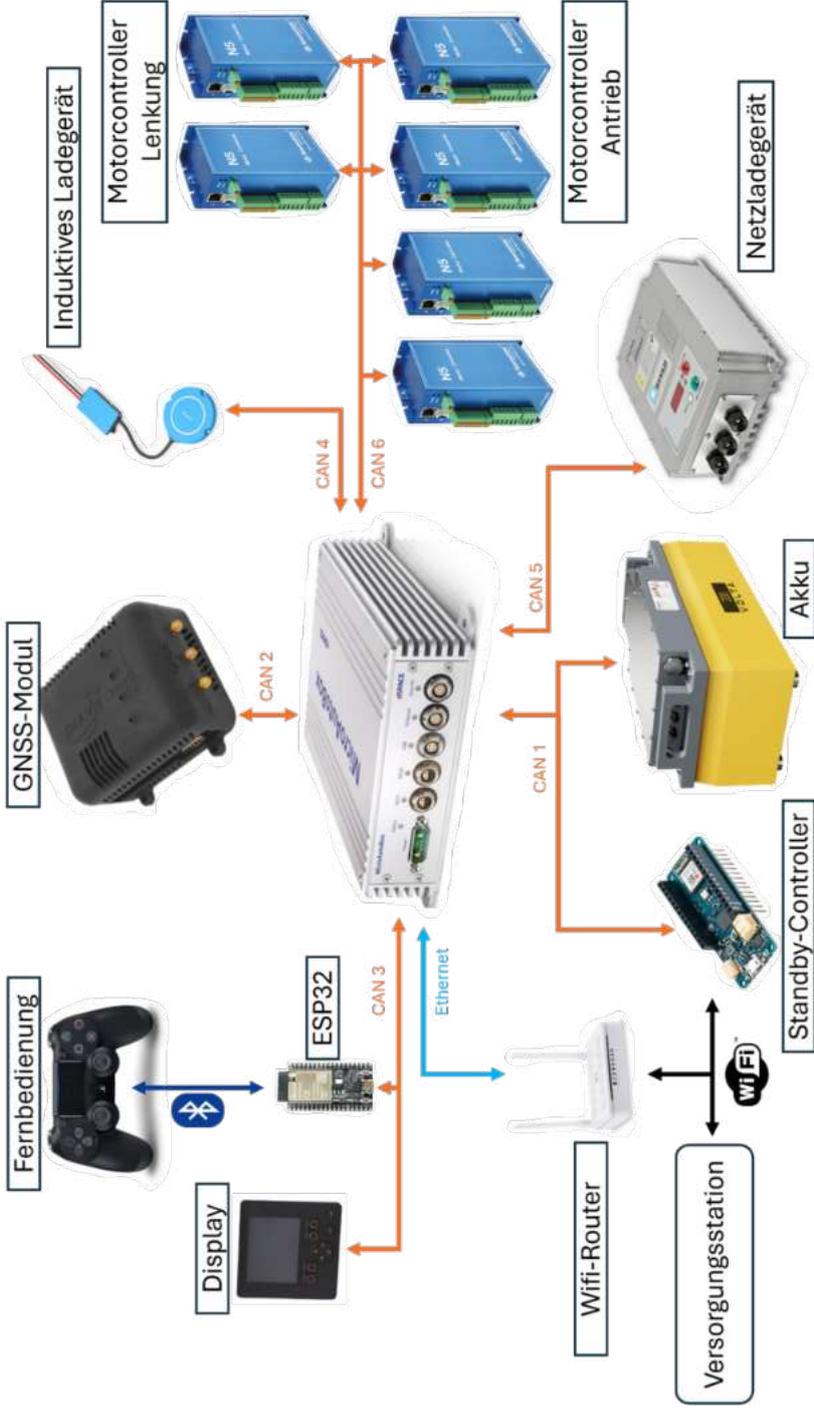


Abbildung 57: Roboter Netzwerktopologie

Anhang C – Zustandsdiagramm des Arbeitsprozesses

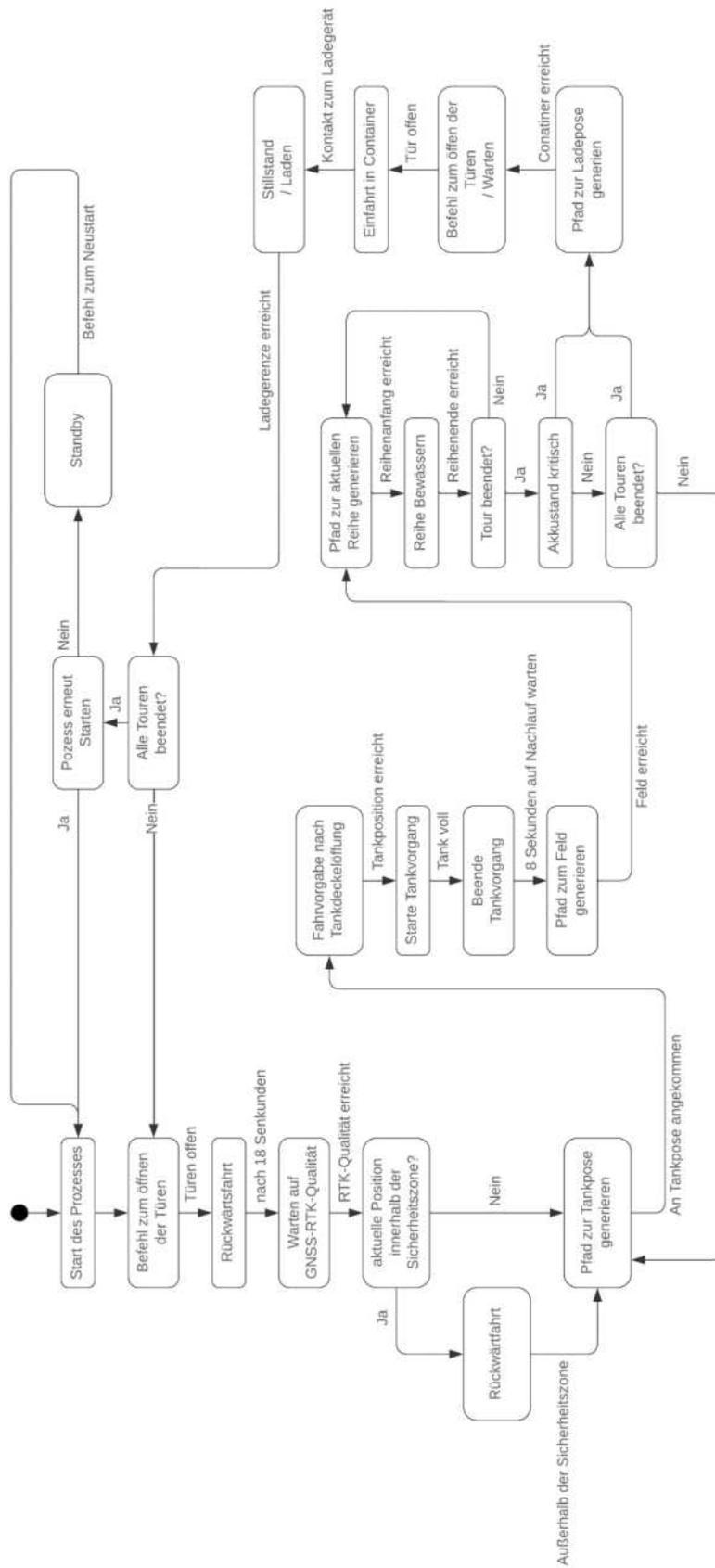


Abbildung 58: Zustandsdiagramm des Arbeitsprozesses

Anhang D – Fotoserie des Arbeitsprozesses



Abbildung 59: Fotoserie des Arbeitsprozesses (1/2)

Vorherige Seite



Transportfahrt



Bewässern



Laden/Shutdown

Abbildung 60: Fotoserie des Arbeitsprozesses (2/2)