Kurze Darstellung
des
Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben

Verbundprojekt:
Ionenselektive Regelung zur ressourceneffizienten und pflanzenbedarfsgerechten Nährstoffversorgung in rezirkulierenden, hydroponischen Indoor Vertical Farms
Teilprojekt C
Kurztitel: „Nutrient_Ctrl_IVF“

Kontaktdaten Antragsteller:

Projektleitung:	Nicole Thorpe
Zuwendungsempfänger:	Experior Microtech GmbH, Fürstenriederstr. 279a, 81377 München
Berichterstatter:	Dr. James Thorpe, Nicole Thorpe

Projektdauer:	01.04.2022 – 30.09.2025
Berichtszeitraum:	01.04.2022 – 30.09.2025

Weitere Projektpartner:

ANEDO GmbH, Eydelstedt

Hochschule Osnabrück (HSO)

I. Kurze Darstellung

I.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

In hydroponischen Systemen erfolgt die Nährstoffsteuerung derzeit überwiegend auf Basis der elektrischen Leitfähigkeit (EC) und des pH-Wertes. Eine direkte Erfassung der ionenspezifischen Zusammensetzung der Nährlösung ist damit nicht möglich, wodurch eine bedarfsgerechte Steuerung einzelner Nährstoffe nur eingeschränkt umgesetzt werden kann.

Ziel des Verbundprojekts „Nutrient_Ctrl_IVF“ war die Entwicklung eines Systems zur ionenspezifischen Messung und Regelung der Nährstoffversorgung in rezirkulierenden hydroponischen Systemen.

Hierzu wurde die ISFET-Messtechnologie genutzt und in ein integriertes Gesamtsystem überführt, das Messung, Datenverarbeitung und Dosierung in einem geschlossenen Regelkreis verbindet.

I.2 Konzeption und Durchführung

Das Vorhaben wurde als interdisziplinäres Verbundprojekt zwischen Wissenschaft und Wirtschaft umgesetzt. Ziel war die durchgängige Entwicklung eines funktionsfähigen Gesamtsystems von der Sensorik bis zur Anwendung im Versuchssystem.

Die Hochschule Osnabrück übernahm die wissenschaftliche Begleitung sowie die Durchführung der Versuche. Die technische Umsetzung, insbesondere in den Bereichen Sensorintegration, Steuerung und Systemanbindung, erfolgte durch die Industriepartner ANEDO GmbH und Experior MicroTech GmbH.

Die Arbeiten wurden im Forschungszentrum Agrarsysteme der Zukunft sowie an den Standorten der Projektpartner durchgeführt. Die Abstimmung im Verbund erfolgte regelmäßig im Rahmen projektbegleitender Meetings.

I.3 Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein integriertes System zur ionenspezifischen Messung und Regelung der Nährstoffversorgung entwickelt und unter Laborbedingungen erfolgreich erprobt.

Das System ermöglicht die kontinuierliche Erfassung relevanter Nährstoffe sowie deren direkte Nutzung für eine automatisierte und bedarfsgerechte Dosierung. Damit wurde ein geschlossener Regelkreis realisiert, der über den bisherigen Stand der EC/pH-basierten Steuerung hinausgeht.

Die Ergebnisse zeigen die technische Umsetzbarkeit eines solchen Systemansatzes und bilden eine Grundlage für die Weiterentwicklung in Richtung praxisnaher Anwendungen.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Teil II des Berichts.

I.4 Zusammenarbeit und Einordnung

Das Forschungsprojekt wurde von einem interdisziplinären Projektteam bearbeitet. Das Projektteam besteht aus Partnern der Wissenschaft und Wirtschaft. Die Partner der Wissenschaft sind die Hochschule Osnabrück Arbeitsgruppe HSOS_Ruck (ehemals Prof. A. Ruckelshausen, nun Prof. C. Meltebrink, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik) und Arbeitsgruppe High Quality GrowSystem (Prof. A. Ulbrich, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsentwicklung). Die Wirtschaftspartner sind Firma ANEDO GmbH (Entwicklung, Produktion und Vertrieb von elektronischen Steuerungssystemen) und Experior MicroTech (Design und Entwicklung internet-basierter Mess- und Regeltechnik für In-door Vertical Farming sowie Hardware und Softwarelösungen zur Digitalisierung von In-door Farming Prozessen). Die hauptsächlichen Tätigkeiten und Arbeiten an den hydroponischen Systemen erfolgten im Forschungszentrum Agrarsysteme der Zukunft (Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsentwicklung) bzw. vorbereitende und weitere Tätigkeiten und Arbeiten erfolgten an den jeweiligen Arbeitsorten der Projektpartnern. Für die Projektorganisation und den fachlichen Austausch zwischen den Projektpartner fanden im 2-wöchigen Rhythmus Projektmeetings statt.

TEIL II – Eingehende Darstellung

Verbundprojekt:

Ionenselektive Regelung zur ressourceneffizienten und pflanzenbedarfsgerechten Nährstoffversorgung in rezirkulierenden, hydroponischen Indoor Vertical Farms

Teilprojekt A

Kurztitel: „Nutrient Crtl ^{IVF}“

Förderkennzeichen: 2818909C20

Kontaktdaten Antragsteller:

Projektleitung: Nicole Thorpe

Zuwendungsempfänger: Experior Microtech GmbH, Fürstenriederstr. 279a, 81377 München

Berichterstatter: Dr. James Thorpe, Nicole Thorpe

Projektdauer: 01.04.2022 – 30.09.2025

Berichtszeitraum: 01.04.2022 – 30.09.2025

Weitere Projektpartner:

ANEDO GmbH, Eydelstedt

Hochschule Osnabrück

1. Durchgeführte Arbeiten im Vergleich zur Vorhabenbeschreibung

Das Teilvorhaben von EMT umfasste zentrale Beiträge zu den Arbeitspaketen

AP 1: Gesamtsystemkonzeption
AP 5: Gesamtsystemintegration
AP 6: Anpassung der Düngeunit(+ISFET) an das High Quality Grow-System ©
AP 9: Evaluation der Düngeunit(+ISFET) in Praxisversuchen mit Wasserlinsen und Süßkartoffeln
AP 10: Auswertung und Wissenstransfer
AP 11: Projektkoordination und Berichtswesen
Zusätzlich unterstützte EMT die Verbundpartner in deren Teilarbeitspaketen, wo notwendig und zielführend (wie im Folgenden erläutert).

EMT legte den Schwerpunkt auf der Konzeption, Entwicklung und Integration eines integrierten Systems zur ionenspezifischen Nährstofferfassung und -steuerung einschließlich der Entwicklung einer durchgängigen Datenarchitektur sowie der Anbindung an eine cloudbasierte Datenumgebung.

Die Arbeiten wurden im Wesentlichen entsprechend der Vorhabenbeschreibung umgesetzt. Im Projektverlauf erfolgten iterative Anpassungen, die sich insbesondere aus der Integration der ISFET-Messtechnik, der Kopplung von Mess- und Steuerungssystemen sowie der Validierung unter Versuchsbedingungen ergaben. Diese Anpassungen dienten der technischen Abstimmung der Systemkomponenten, der Verbesserung der Datenkonsistenz sowie der Stabilisierung des Gesamtsystems.

AP 1 – Gesamtsystemkonzeption

In Zusammenarbeit aller Projektpartner wurde ein Gesamtkonzept zur Realisierung der Projektziele entwickelt. Die erforderlichen Schnittstellen wurden definiert und ein konsistentes Datenmanagementkonzept erarbeitet.

Die Zielnährstoffkonzentrationen und Zusammensetzungen für die Versuchskulturen Wasserlinse (Lemna) und Süßkartoffel wurden festgelegt. Eine Markt- und Schutzrechtsrecherche (Internet, DPMA) ergab keine vergleichbaren Systeme oder bestehenden Schutzrechte im Bereich ionenspezifisch gesteuerter Düngeeinheiten für hydroponische Anwendungen.

EMT entwickelte gemeinsam mit den Partnern die funktionale und datenbezogene Systemarchitektur des Gesamtsystems. Dies umfasste insbesondere:

- Definition der Systemanforderungen sowie Abstimmung der technischen Verantwortlichkeiten,
- Entwicklung eines technischen Systemschemas (Fließbild),
- Festlegung der Hardware- und Softwareschnittstellen,
- Beschreibung der Datenflüsse und Cloud-Anbindung,
- Konzeption der ISFET-Sensorintegration sowie der Softwareschnittstellen zur Düngeeinheit,
- Spezifikation der Düngeeinheit (inkl. CAD-Auslegung) und Abstimmung mit den Versuchssystemen,
- Unterstützung der Hochschule Osnabrück bei der Definition des Versuchsaufbaus.

Zudem führte EMT ein projektweites IP-Logbuch zur strukturierten Erfassung von Entwicklungen und zur transparenten Zuordnung geistigen Eigentums ein.

Ergebnisse

- Definierte Systemarchitektur und technisches Fließbild,

- Festgelegte Schnittstellen, Datenstrukturen und Datenflüsse,
- Spezifizierte Düngeeinheit mit Sensorintegration und Cloud-Anbindung,
- Klare Rollenverteilung und eingeführtes IP-Logbuch.

AP 1 schuf die konzeptionelle Grundlage für die technische Umsetzung und ermöglichte die koordinierte Integration sowie Weiterentwicklung des Gesamtsystems.

AP 2.3 / AP 3.3 – Datenerfassung und Versuchssysteme

EMT unterstützte die Projektpartner in AP 2 und AP 3 bei der technischen Umsetzung und instrumentellen Vorbereitung der Versuchssysteme für Wasserlinse und Süßkartoffel. Während die Hauptverantwortung für die biologischen und versuchstechnischen Arbeiten bei der Hochschule Osnabrück lag, leistete EMT unterstützende Beiträge zur Sensorintegration und Datenbereitstellung.

Die Arbeiten umfassten insbesondere:

- Bereitstellung, Installation und Inbetriebnahme von Sensorik zur Erfassung von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, CO_2 und gelöstem Sauerstoff im Lemna-Versuchssystem,
- Unterstützung beim Aufbau der Versuchsanlage und der Sensorik im Süßkartoffelsystem,
- Unterstützung bei der Datenerfassung sowie bei der Extraktion und ersten Verarbeitung der Versuchs- und Umweltdaten,
- Abstimmung der Messgrößen und Datennutzung im Hinblick auf die spätere Einbindung in die Steuerungs- und Auswertelogik.

Ergebnisse:

- Funktionsfähige Datenerfassungssysteme in den Versuchsanlagen,
- kontinuierliche Erfassung relevanter Umwelt- und Prozessparameter,
- erste strukturierte Aufbereitung von Versuchsdaten als Grundlage für die weitere Systementwicklung.

AP 4 – Bauliche Anpassungen

Modifikation der hydroponischen Systeme zur Integration der Düngeunit + ISFET.SPLITTERBOX

Trotz der zu Projektbeginn in AP1 definierten Systemarchitektur wurde im Projektverlauf seitens des Konsortiums eine Anpassung des Betriebs des Süßkartoffelsystems erforderlich. Seitens HSO wurde gefordert, das System dahingehend zu erweitern, dass anstelle eines einzelnen geschlossenen Hydroponiksystems bis zu vier unabhängige, geschlossene Hydroponiksysteme über eine zentrale Düngeeinheit gesteuert werden können.

Die Nutzung von bis zu vier separaten Systemen ermöglichte es HSO, innerhalb der Projektlaufzeit eine deutlich größere Bandbreite an Wachstumsrezepturen zu testen. Dadurch wurde die technische Basis geschaffen, um sowohl den Erkenntnisgewinn als auch die Wahrscheinlichkeit belastbarer und positiver Ergebnisse zu steigern.

Zur Umsetzung dieser Anforderung mussten die Sensorik- und Düngeeinheitssysteme von Anedo sowie EMT gegenüber ihrer ursprünglichen Konfiguration angepasst werden. Für EMT bedeutete dies insbesondere die Entwicklung und Fertigung einer zusätzlichen Splitterbox, welche die Verteilung der Nährlösung von einer zentralen Düngeeinheit auf bis zu vier separate, geschlossene Kreislaufsysteme ermöglicht.

Darüber hinaus wurde die Cultinova-Steuerungssoftware der Düngeeinheit entsprechend erweitert, um die erhöhte Komplexität bei der Ansteuerung der Splitterbox abzubilden. Ergänzend dazu wurde ein geeigneter Schaltkasten mit vier Pumpen sowie einem zugehörigen Behältersystem durch EMT konzipiert und in Zusammenarbeit mit HSO umgesetzt.

Nach einer Evaluierungs- und Charakterisierungsphase bei HSO konnten die erforderlichen Pumpenlaufzeiten innerhalb der Verteilerbox definiert werden. Im Ergebnis wurde die geforderte, parallele Dosierung für bis zu vier unabhängige geschlossene Hydroponiksysteme über eine zentrale Düngeeinheit erfolgreich realisiert.

AP 5 – Gesamtsystemintegration

In AP 5 wurden die in AP 1 konzipierten Komponenten schrittweise zu einem funktionalen Gesamtsystem zusammengeführt. Der Fokus lag auf der technischen Integration von ISFET-Messsystem, Düngeeinheit, Steuerungssoftware und Datenübertragung.

Die Arbeiten umfassten insbesondere:

- Integration des ISFET-Messsystems mit der Düngeeinheit bzw. Steuerungssoftware und dem Industrie-PC-basierten Steuerungssystem,
- Entwicklung und Bewertung verschiedener Integrationskonzepte für die Übernahme von Messdaten in die Steuerungslogik,
- Implementierung softwareseitiger Schnittstellen zur Übertragung von Messdaten vom ANEDO-System an die EMT-Steuerung,

- Entwicklung und Installation von zwei Düngeeinheiten für die Lemna- und Süßkartoffel-Versuchsanlagen,
- Anpassung der Steuerungssoftware zur Echtzeit-Erfassung von ISFET-Messdaten und zur bedarfsgerechten Nährstoffzufuhr,
- Aufbau einer durchgängigen Datenverarbeitung und Schaffung der technischen Grundlage für die spätere Cloud-Anbindung.

Im Projektverlauf wurden zwei Integrationsansätze für die Kopplung von ISFET-Messsystem und Düngeeinheit betrachtet: eine ISOBUS-basierte Anbindung über eine externe Master-Steuereinheit sowie eine direkte API-basierte Kopplung über ein Industrie-PC-/vIPC-Konzept. Damit wurde eine belastbare technische Grundlage für die Umsetzung des High Quality Grow Systems geschaffen.

Ergebnisse:

- Funktional integriertes Gesamtsystem aus Sensorsystem, Steuerung und Düngeeinheit,
- etablierter Regelkreis mit Messung, Datenübertragung, Verarbeitung, Sollwertabgleich und Ableitung von Steuergrößen,
- API-basierte Kommunikation zwischen den Systemkomponenten,
- zwei installierte Düngeeinheiten für die Versuchssysteme,
- technische Grundlage für die Cloud-Anbindung und Fernverfügbarkeit der Systemdaten.

EMT übernahm eine zentrale Rolle bei der Gesamtsystemintegration, insbesondere bei der Entwicklung der Düngeeinheit, der Schnittstellenimplementierung, der Steuerungsarchitektur und der technischen Kopplung von Mess- und Dosiersystem.

AP 5.5 /6.4 – Cloud, API und Systemoptimierung

Ein wesentlicher Bestandteil des Vorhabens war die Entwicklung und Weiterentwicklung der cloudbasierten Dateninfrastruktur sowie der softwareseitigen Kommunikation zwischen Messsystem, Steuerung und Datenumgebung.

Die Arbeiten umfassten insbesondere:

- Definition kritischer Parameter und Datenkanäle für die Cloud-Anbindung in Abstimmung mit der Hochschule Osnabrück,
- Entwicklung und Erweiterung einer REST-API zur Übertragung von Mess- und Betriebsdaten in die Cloud-Anwendung,
- Entwicklung eines Cloud-Clients und Durchführung erster Softwaretests zur Datenübertragung an die grafische Benutzeroberfläche,

- Weiterentwicklung der Cultinova EDGE-Software zur gleichzeitigen Interaktion mit ANEDO- und EMT-Systemen,
- Integration einer HTML-basierten GUI (Graphical User Interface) des Remote-Messsystems in die EDGE-Software,
- Entwicklung des Cultinova-Clients als softwareseitige Schnittstelle zwischen Messsystem und Steuerung,
- Erweiterung der internen REST-API der EDGE-Software zur Übertragung von Messdaten an die cloudbasierte Anwendung C 365 sowie zum Abruf von Konfigurationen aus der Cloud,
- Einführung zusätzlicher Kalibrierungs- und Plausibilitätsfunktionen zur Erkennung von Offsets, Messgrenzen und fehlerhaften Messwerten.

Die Cloud-Anwendung wurde so weiterentwickelt, dass Sensor- und Maschinendaten in Echtzeit von Düngeeinheit und ISFET-Messsystem empfangen und zusammen mit manuell eingegebenen Prozess- und Qualitätsdaten gespeichert werden konnten. Gleichzeitig wurden die lokalen Softwarekomponenten angepasst, um einen Fernzugriff auf Messdaten und Konfigurationen zu ermöglichen.

Ergebnisse:

- Funktionierende cloudbasierte Datenplattform zur Speicherung und Bereitstellung von Mess- und Betriebsdaten,
- Echtzeit-Datenübertragung zwischen lokalen Systemen und Cloud,
- verbesserte Benutzerführung durch Integration der GUI in die EDGE-Software,
- Remote-Zugriff auf Messdaten und Konfigurationsparameter,
- verbesserte Datenqualität und robustere Steuerungsentscheidungen durch Kalibrierungs- und Plausibilisierungsfunktionen.

Bedeutung:

Die Arbeiten in AP 5.5 und AP 6 schufen eine Datenkette vom Sensor über die Steuerungslogik bis zur Cloud-Speicherung und -Auswertung. Gleichzeitig erhöhte die Optimierung der Softwarekomponenten die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Systems unter Versuchsbedingungen.

AP 7 / AP 8 – Steuerungslogik und Datenerfassung

In AP 7 und AP 8 wurden die Datenerfassungs- und Steuerungsfunktionen weiterentwickelt und an die Anforderungen der Lemna- und Süßkartoffel-Systeme angepasst.

Die Arbeiten umfassten insbesondere:

- Erweiterung der EDGE-Software zur Erfassung zusätzlicher Umweltparameter wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und CO_2,
- Integration von Datenextraktionsalgorithmen und Anpassung der Datenerfassungsroutinen,
- Implementierung kulturspezifischer Steuerungsroutinen für Wasserlinsen mit typischen Sollwerten für Nährstoffniveaus,
- Anpassung der Steuerungssoftware im Süßkartoffelsystem zur automatisierten Messung und Dosierung einzelner Ionen sowie zur pH-Steuerung,
- Weiterentwicklung des Kontrollalgorithmus zur regelmäßigen Übernahme von Einzelionen-Messwerten und zur Ableitung der Pumpenlaufzeiten,
- Implementierung einer automatischen Spülroutine mit deionisiertem Wasser zur Reduzierung von Ablagerungen und zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit.

Die Steuerungslogik wurde so ausgelegt, dass Messwerte in definierten Intervallen empfangen, mit Sollwerten abgeglichen und in Steuergrößen für die Dosierkomponenten übersetzt werden konnten. Mehrere Testreihen dienten der Abstimmung der Pumpenlaufzeiten auf Düngerlösungskonzentration und Anwendungsanforderungen.

Ergebnisse:

- Erweiterte und strukturierte Datenerfassung für Lemna- und Süßkartoffel-Systeme,
- funktionale Steuerungsroutinen für die regelbasierte Nährstoffdosierung,
- verbesserte Anpassungsfähigkeit des Systems an unterschiedliche Kulturen und Versuchsbedingungen,
- automatisierte Spülfunktion zur Unterstützung eines stabilen Anlagenbetriebs.

Bedeutung:

Mit AP 7 und AP 8 wurde die operative Steuerungslogik des Systems weiter ausgebaut. Dadurch konnten kulturspezifische Anforderungen in die Datenerfassung und Dosiersteuerung überführt werden.

Beitrag EMT:

EMT hatte eine wesentliche Rolle bei der Weiterentwicklung der Steuerungssoftware, der Datenverarbeitungsfunktionen und der Implementierung der Regelalgorithmen.

AP 9 – Evaluation und funktionale Validierung

In AP 9 wurde das Gesamtsystem unter kontrollierten Labor- und Versuchsbedingungen untersucht und funktional validiert. Ein Schwerpunkt lag auf der Bewertung des Zusammenspiels von Messsystem, Datenverarbeitung, Steuerungslogik und Düngeeinheit.

Die Arbeiten umfassten insbesondere:

Langzeitbetrieb der Systeme sowie Analyse der Systemreaktionen auf veränderte Messbedingungen

Im Verlauf der Evaluation wurden unter anderem Abstimmungsbedarfe in Bezug auf Mehrkreissysteme, Messwertqualität und Datenverarbeitung identifiziert. Durch die Ausweitung auf ein Merkanalsystem konnten nun bis zu vier separate geschlossene Kreisläufe versorgt werden konnten. Hierfür wurde eine Vierwege-Verteilerbox entwickelt und integriert.

Darüber hinaus wurden softwareseitige Mechanismen eingeführt, um fehlerhafte oder außerhalb definierter Grenzen liegende Messwerte zu erkennen und bei Steuerungsentscheidungen nicht zu berücksichtigen. Ebenfalls wurden Anpassungen vorgenommen, um Diskrepanzen in der Synchronisation zwischen Messwertbereitstellung und Verarbeitung zu korrigieren.

Ergebnisse:

- Nachweis der funktionalen Kopplung aller Systemkomponenten,
- Stabilisierung der Abläufe im Zusammenspiel von Messung, Verarbeitung und Steuerung,
- Verbesserung der Zuverlässigkeit des Systems durch Filterung fehlerhafter Messwerte und Optimierung der Softwarelogik,
- Erweiterung der Systemarchitektur auf Mehrkreissysteme,
- Validierung der durchgängigen Datenkette einschließlich Cloud-Anbindung Bedeutung:

AP 9 erbrachte den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Systems unter Laborbedingungen im Sinne eines integrierten datenbasierten Steuerungsansatzes. EMT übernahm in AP 9 eine zentrale Rolle bei Fehleranalyse, Systemoptimierung, softwareseitiger Anpassung und Stabilisierung des Gesamtsystems.

AP 10 / AP 11 – Auswertung, Wissenstransfer und Koordination

EMT wirkte kontinuierlich an der Auswertung, Dokumentation und Kommunikation der Projektergebnisse mit. Dies umfasste sowohl die technische Aufbereitung der Ergebnisse als auch die organisatorische Abstimmung im Konsortium.

Die Arbeiten umfassten insbesondere:

- Berichtswesen (Zwischenberichte und Abschlussdokumentation)
- kontinuierliche Abstimmung in regelmäßigen Jour-fixe-Meetings sowie in bilateralen Gesprächen,
- Mitwirkung an der Vorbereitung und Präsentation von Ergebnissen im Rahmen von Projekt- und Netzwerktreffen,
- Unterstützung des fachlichen Austauschs, unter anderem im Umfeld des INUGA-Innovationsnetzwerks.

Ergebnisse:

- Strukturierte technische Dokumentation des Projektfortschritts,
- kontinuierliche Abstimmung und Koordination der Entwicklungsarbeiten,
- Einbindung der Ergebnisse in Austausch- und Transferformate.

Bedeutung:

Die Arbeiten in AP 10 und AP 11 unterstützten die konsistente Durchführung des Vorhabens und trugen zur Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsschritte im Verbund bei.

Zusammenfassende Bewertung

Ein zentrales Ergebnis des Teilvorhabens ist die Realisierung eines integrierten, datenbasierten Systems zur ionenspezifischen Steuerung von Nährstofflösungen. Das System umfasst die Erfassung von Messdaten aus ISFET-Sensorik und ergänzender Umweltsensorik, deren Übertragung über definierte Schnittstellen, die Verarbeitung und Nutzung zur Steuerung der Düngeeinheit sowie die Speicherung und Bereitstellung der Daten in einer cloudbasierten Umgebung.

EMT leistete hierzu sowohl konzeptionelle als auch operative Beiträge. Insgesamt wurden alle ursprünglichen Ziele des Teilvorhabens erreicht und wie beschrieben, sogar teilweise erweitert (z.B. 4 Kanal Upgrade). Zudem wirkte EMT in AP 2/3 unterstützend an Sensorintegration, Datenerfassung und Datenverarbeitung mit. Diese unterstützenden Beiträge waren für die Konsistenz der Datenbasis und die technische Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems wesentlich.

Die entwickelten Systemkomponenten wurden im Sinne eines Technologie-Reifegrades bis TRL 5 in einer kontrollierten Versuchs- und Laborumgebung funktional validiert.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (kommentierend, ohne Zahlen)

Die Mittel wurden gemäß Zuwendungsbescheid bzw. dessen Anpassungen durch den Projektträger verwendet. Wesentliche Ausgabenkategorien:

• Personalkosten stellten den größten Kostenanteil dar und wurden gemäß tatsächlich geleisteter produktiver vorhabensbezogener Arbeitsstunden erfasst und innerhalb des vorgegebenen Finanzrahmens gemäß Zuwendungsbescheid abgerechnet.

• Sachausgaben/Materialien wurden im Einklang mit dem Antrag/Zuwendungsbescheid verausgabt.

• Reisekosten wurden gemäß BLE Zuwendungsbescheid abgerechnet.

• Dienstleistungen Dritter wurden gemäß dem Antrag verausgabt.

Sämtliche Gelder wurden quartalsweise rechtzeitig abgerufen.
Im Rahmen des Projektes wurden geringfügige Mittel zur Unterstützung von Vernetzungs- und Transferaktivitäten aufgestockt. Sämtliche Kosten in Verbindung mit Arbeiten bzw. Maßnahmen im Rahmen der bewilligten Verlängerung trug EMT selbständig.

.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten waren aus wirtschaftlich-technischer Sicht sowohl notwendig als auch angemessen, um die in der Vorhabenbeschreibung definierten Ziele zu erreichen und die Umsetzung der entwickelten Systeme zu gewährleisten.

Das Vorhaben schließt die Lücke zwischen einer rein EC/pH-basierten Steuerung und einem differenzierten Mehrionen-Management. Die Entwicklung und Bereitstellung eines hydroponischen Systems mit Düngeunit+ISFET zur ionenspezifischen Düngung stellt eine komplexe technologische und verfahrenstechnische Herausforderung dar. Nach aktuellem Stand ist die ionenspezifische Düngung in dieser Form weiterhin als innovativ und in dieser Integration als einzigartig einzuordnen.

Die ambitionierten Arbeiten konnten nur durch die enge Zusammenarbeit und die komplementären Kompetenzen der Verbundpartner umgesetzt werden. Ohne die Förderung sowie die Kooperation im Verbund wäre eine Umsetzung in dieser Form nicht möglich gewesen.

Eine wesentliche Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz automatisierter Düngungssysteme ist die langfristige Stabilität und Genauigkeit der eingesetzten Sensorik. Die Validierung und Kalibrierung von ISFET-, EC-, pH- und Temperatursensoren war daher zwingend erforderlich. Nur durch diese Arbeiten konnte eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden, die eine stabile Prozessführung und eine verlässliche Steuerung der Nährstofflösung ermöglicht.

Das Vorhaben stellt eine bedeutende Weiterentwicklung der ISFET-basierten Technologie dar und bildet einen wichtigen Schritt hin zu einem robusten Anwendungssystem. Dies umfasste insbesondere:

- die Optimierung der Hardware (Mehrkanal-Dosiereinheit, Ventilsteuerung, Sensoreinbindung),
- die Weiterentwicklung der Softwareanbindung (Cultinova EDGE / C-365-API),
- sowie die Anpassung der Regelungslogik an unterschiedliche Kulturbedingungen.

Die durchgeführten pflanzenphysiologischen Versuche sowie die Projektverlängerung dienten der systematischen Robustheitsprüfung unter realitätsnahen Laborbedingungen. Nur durch die verlängerte Versuchsdauer konnten Schwankungen im Pflanzenwachstum, Sensorverhalten und Umwelteinflüssen ausreichend berücksichtigt und die Regelparameter entsprechend angepasst werden. Diese Arbeiten waren entscheidend für die Bewertung der Systemzuverlässigkeit und die Vorbereitung weiterer Entwicklungsschritte.

Die modulare Systemarchitektur wurde bewusst so ausgelegt, dass unterschiedliche Sensor- und Aktorkomponenten integrierbar sind. Dies eröffnet die Möglichkeit einer flexiblen Anpassung an verschiedene Anwendungskontexte (z. B. Forschungssysteme, Gewächshäuser, Containerfarmen) und war eine notwendige Voraussetzung für eine spätere wirtschaftliche Nutzung.

Das Vorhaben leistet einen Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung im Bereich präzisionsgesteuerter Pflanzenernährung und stärkt den Wissenstransfer zwischen Forschung und KMU. Dadurch wird die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Partner unterstützt.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Vorhaben NutriControl stellt einen richtungsweisenden Schritt für eine ressourcenschonende und klimaangepasste Pflanzenproduktion dar. Durch die präzisere Nährstoffüberwachung und die bedarfsgerechte Einzelnährstoffdosierung besteht das Potenzial, Produktionsprozesse zu stabilisieren, Düngerverluste zu reduzieren sowie Ertragsqualität und Pflanzengesundheit zu verbessern.

Die Ergebnisse bieten ein hohes Anwendungspotenzial insbesondere für Indoor- und Vertical-Farming-Systeme. Die entwickelte Technologie wird in die bestehende Cultinova-Plattform (C EDGE / C-365-API) integriert und trägt dort zur weiteren Digitalisierung und Optimierung von Produktionsprozessen bei.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden eine tragfähige Grundlage für die Weiterentwicklung präzisionsgesteuerter Nährstoffmanagementsysteme. Durch die Kombination aus robuster Sensorik, modularer Systemarchitektur und digitaler Regelungslogik wurden wesentliche Voraussetzungen geschaffen, um Nährstoffprozesse künftig automatisiert, effizient und pflanzenbedarfsgerecht zu steuern.

Die praktische Verwertbarkeit liegt insbesondere in der Möglichkeit, die entwickelten Komponenten in bestehende Versuchsanlagen, Testsysteme und Demonstrationsumgebungen zu integrieren. Dadurch wird ein direkter Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung ermöglicht und ein realitätsnaher Rahmen für die Weiterentwicklung in Richtung marktfähiger Lösungen geschaffen.

Darüber hinaus stellen die im Projekt erhobenen Daten und Erkenntnisse eine wertvolle Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar, insbesondere in den Bereichen:

- digitale Prozesssteuerung,
- datenbasierte Regelstrategien,
- modellgestützte Nährstoffoptimierung.

Diese können im Rahmen zukünftiger Forschungsvorhaben, Pilotanwendungen oder industrieller Entwicklungen weiter vertieft werden.

Langfristig tragen die Projektergebnisse dazu bei, die Ressourceneffizienz, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit in der Pflanzenproduktion zu verbessern und Innovationen im Bereich sensorbasierter Steuerung und Datennutzung nachhaltig zu fördern.

Zur weiteren Verwertung der Projektergebnisse wurde eine Projektskizze im Rahmen der Deutschen Innovationspartnerschaft Agrar (DIP) eingereicht (Akronym: HYDION – Hydroponisches Ionen-Management-System für die pflanzenbedarfsgerechte Nährstoffversorgung). Ziel ist es, die entwickelten Ansätze in Richtung praxisnaher Anwendung weiterzuführen.

5. Fortschritte bei anderen Stellen

Nach eigenen Kenntnissen ist die Düngeunit^{+ISFET} bislang das einzige System, welches – mit der ISFET-Messtechnologie – ionenspezifisch Nährstoff analysiert und mit Hilfe einer Düngeunit in ein hydroponisches System ionenspezifisch Nährstoff hinzudosiert.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF,

Es wurden die Ergebnisse in Form von Vorträgen und Poster auf folgenden Veranstaltungen und Konferenzen publiziert:

<u>Vorträge</u>

- von Salzen, J., Fischer, P. H., Geitner, C., Hinck, S., Riedel, V., Terhaag, M., Thorpe, J., & Ulbrich, A. (2025). Nutrient+Ctrl^{IVF} - Ionenselektive Regelung zur ressourceneffizienten und pflanzenbedarfsgerechten Nährstoffversorgung in rezirkulierenden, hydroponischen Indoor Vertical Farms (IVF). Vortrag: INUGA Kongress 2025, 28. Mai 2025, online.

- von Salzen, J., Fischer, P. H., Geitner, C., Hinck, S., Mohrmann, J. H., Riedel, V., Terhaag, M., Thorpe, J., & Ulbrich, A. (2024). Nutrient+Ctrl^{IVF} - Ionenselektive Regelung zur ressourceneffizienten Nährstoffversorgung in rezirkulierenden hydroponischen Indoor Vertical Farms (IVF). Vortrag: Innovationstage 2024, 04.-06.11.2024, Berlin. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:959-opus-82573

- Petersen, Finn; von Salzen, Jannis, Ulbrich, Andreas (2023). Nutrient+Ctrl^{IVF} Ion selective control for resource efficient and plant demand driven nutrient supply in re-circulating hydroponic indoor vertical farms. Vortrag: Agritechnica 2023, 13.11.2023, Hannover.

Poster

- von Salzen, Jannis; Fischer, Paul; Riedel, Vadim; Hinck, Stefan; Thorpe, James; Terhaag, Matthias; Mohrmann, Jan Hauke; Geitner, Christoph; Ulbrich, Andreas (2025). Einsatz von ISFET-Sensoren zur Regelung von ausgewählten Makronährstoffen im geschlossenen hydroponischen Anbau von Süßkartoffeln (*Ipomoea batatas*): Nutrient Crtl ^{IVF}. Poster: 57. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gartenbauwissenschaftlichen Gesellschaft (DGG), Essen (NRW).

Literaturangaben

- von Salzen, Jannis; Fischer, Paul; Geitner, Christoph; Hinck, Stefan; Mohrmann, Jan Hauke; Riedel, Vadim; Terhaag, Matthias; Thorpe, Nicole; Thorpe, James; Ulbrich, Andreas (2025). Nutrient+Ctrl IVF - Ionenselektive Regelung zur ressourceneffizienten und pflanzenbedarfsgerechten Nährstoffversorgung in rezirkulierenden, hydroponischen Indoor Vertical Farms (IVF). Tagungsband der BLE Innovationstagen 2024, S. 62 – 63. https://www.innovationsfoerderung-bmel.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/6_Innovationstage/Tagungsband-Innovationstage2024-Web.pdf

https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:959-opus-82573

- Riedel, Vadim; Hinck, Stefan; Peiter, Edgar; Ruckelshausen, Arno (2024a). Concept and Realisation of ISFET-Based Measurement Modules for Infield Soil Nutrient Analysis and Hydroponic Systems. Electronics 13(13): 2449. https://doi.org/10.3390/electronics13132449 urn:nbn:de:bsz:959-opus-65803

- Riedel, Vadim; Hinck, Stefan; Peiter, Edgar; Ruckelshausen, Arno (2024b). Handling of Ion-Selective Field-Effect Transistors (ISFETs) on Automatic Measurements in Agricultural Applications Under Real-Field Conditions. Electronics, 13(24), 4958. https://doi.org/10.3390/electronics13244958 urn:nbn:de:bsz:959-opus-68615

Die Veröffentlichung „*Handling of Ion-Selective Field-Effect Transistors (ISFETs) on Automatic Measurements in Agricultural Applications Under Real-Field Conditions*“ wird im internationalen online Gartebau-Magazinhortidaily: https://www.hortidaily.com/article/9690560/german-study-looks-at-side-effects-of-automatic-measurements-in-agriculture/ als Literatur empfohlen.

Datenveröffentlichung

Riedel, Vadim, 2024,
"ISFET sensors measurement data for nutrient analysis in hydroponic systems", https://doi.org/10.25625/K6KKIA (Datensatz gehört zur Veröffentlichung Riedel et., 2024b)

7. Stand der Wissenschaft und Technik (optional)

Hydroponische Systeme sind meist über Leitfähigkeit und pH-Wert gesteuert. Nutrient + Ctrl IVF ermöglicht erstmals eine ionenspezifische Regelung durch ISFET-Sensorik und erweitert damit den Stand der Technik

8. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Das Projekt Nutrient + Ctrl IVF hat ein funktionales, ionenselektives Regelungssystem für hydroponische Kulturen entwickelt und unter Praxisbedingungen erprobt. Die Kombination von

Sensorik, Cloud-Infrastruktur und Steuerung ermöglicht eine bedarfsgerechte, ressourceneffiziente Pflanzenernährung und trägt zur nachhaltigen Transformation der Landwirtschaft bei.

Anhang

Software und Benutzeroberflächen	
	Abb. 1: Benutzeroberfläche – Admin/Login
	Abb. 2: Benutzeroberfläche – Sensorübersicht
	Abb. 3: Steuerungssoftware Interface

Systemaufbau und Hardware	
	Abb. 4: Versuchsaufbau Wasserlinsensystem
	Abb. 5: Versuchsaufbau Süßkartoffel

	Abb. 6: Splitterbox (Detail)
	Abb. 7: Düngeeinheit mit Vorratsbehältern