Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht

-

GeoSenSys (Teilprojekt 5)

als Forschungsvorhaben auf dem Gebiet

„Gartenbau 4.0“

im Rahmen des Programms zur

Innovationsförderung

der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

Zuwendungsempfänger:	Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Förderkennzeichen:	2818509E18
Vorhabenbezeichnung:	Georeferenziertes Sensorgestütztes Daten-Management-System zur teilflächenspezifischen Bewässerung und Düngung von Freilandgemüse (GeoSenSys) – Teilprojekt 5
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2020 – 31.05.2024
Berichtszeitraum:	01.01.2020 – 31.05.2024
Bearbeiter:	Dr. Jürgen Schulz

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung des Vorhabens 3

1. Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde 3
2. Ablauf des Vorhabens..... 4
3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... 4

II. Eingehende Darstellung 5

1. Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Arbeiten 5
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....19
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 20
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 20
5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 22
6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF .22

I. Kurze Darstellung des Vorhabens

1. Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde

Das Gesamtprojektziel war die Entwicklung eines georeferenzierten, sensorbasierten Expertensystems (GeoSenSys) für eine teilflächenspezifische Steuerung von N-Düngung und Bewässerung im Freilandgemüsebau (hier speziell im Spinatanbau).

Die Fa. Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG (FMU) entwickelt und produziert seit mehreren Jahren Sensoren, mit denen es möglich ist, den Versorgungszustand von Kulturpflanzen zu erfassen und diese Information zu nutzen, Dünger bedarfsgerecht und teilflächenspezifisch auszubringen. Zu Projektbeginn war die Nutzung dieser online-Sensorik hauptsächlich in Getreide- und Hackfruchtanbau etabliert. Im Rahmen des Projektes sollte eruiert werden, ob eine Angebotsausweitung auf den Freilandgemüsebau möglich und auch wirtschaftlich darstellbar wäre.

Die Ermittlung des Bewässerungsbedarfs erfolgt im Gemüsebau meist auf Grundlage der klimatischen Wasserbilanz, die den kulturspezifischen Wasserbedarf auf Basis von Evapotranspiration (ET), Niederschlag, Bewässerungsmenge und Kc-Werten berechnet. Sensoren zur Erfassung von Vegetationsindices (VIs), die eng mit Bestandeseigenschaften korrelieren, werden seit längerem eingesetzt um den Düngebedarf, und weiter erforscht, um den Wasserbedarf zu bestimmen. Zu Projektbeginn gab es kein bekanntes Fernerkundungssystem zur online-Bestimmung des Wassergehalts von Pflanzen. So sollte mit dem Expertenwissen der Projektpartner die Frage beantwortet werden, ob es möglich ist, zusätzlich zur genauen Düngerbemessung, auch den Bewässerungsbedarf von Kulturpflanzen mit optischen Sensoren zu erfassen. Hierzu stellte sich FMU die Aufgabe, ein ISARIA-System, das bis dato zur Abschätzung der Düngerausbringmenge bestimmt war, so zu modifizieren, dass damit auch die Messung von aus der Literatur bekannten Wassergehaltsindices[1] möglich ist.

In den diversen Arbeitspaketen wurden mit den ISARIA-Sensoren Spektraldaten erhoben, aus denen Vegetationsindices ermittelt wurden, die wiederum in die dynamischen Wachstums-modelle der Projektpartner (siehe Abschlussberichte dort) Eingang fanden.

Die Wirksamkeit des GeoSenSys-Entscheidungshilfesystems sollte unter Einbeziehung von Sensordaten in Praxisbetrieben evaluiert werden.

[1] Penuelas, J., Filella, I., Biel, C.: The Reflectance at the 950-970nm Region as an Indicator of Plant Water Status. International Journal of Remote Sense 14, 1887-1905 (1993)

2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt umfasste elf Arbeitspakete (APs). Die Zeitplanung basiert auf der Meilensteinplanung des gemeinsamen Projektantrags mit den Projektpartnern Hochschule Geisenheim University (HGU), Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau, Großbeeren (IGZ), Geoinformationsdienst GmbH (GID) und Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR).

FMU arbeitete in folgenden APs mit: In AP-2 (GID, FMU, DLR) wurden gemeinsam mit dem GID Schnittstellen zur Integration von Sensordaten in das GeoSenSys entwickelt. Im AP-3 (FMU, DLR, HGU) wurde der Serien-ISARIA-Sensor um „Wasserbänder“ erweitert, dass damit zusätzlich zu den für die Düngebedarfsbestimmung benötigten VIs (IRMI, IBI, NDVI) auch die Wasserbänder im Nahinfrarotbereich gemessen werden können. AP-4 (FMU, HGU, DLR, GID) zielte auf die Ermittlung von VIs zur Steuerung der Bewässerung und N-Düngung ab. Abschließend wurde in AP-11 (alle Teilprojekte & Praxisbetriebe) das GeoSenSys System im praktischen Einsatz validiert und mit konventioneller N-Düngeempfehlung und Bewässerungssteuerung verglichen, wobei die Effizienz anhand des Ertrags bewertet wurde.

3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurden Modelle für die teilflächenspezifische Bewässerung und N-Düngung von Freilandgemüse am Beispiel der Modellkultur Spinat entwickelt. Die entwickelten Modelle sind miteinander gekoppelt, indem sie auf einer gemeinsamen Datengrundlage basieren. Dabei lassen sich die Ergebnisse aus dem N-Düngungsmodell durch Hinzunahme der mit den ISARIA-Sensoren ermittelten VIs signifikant verbessern. Ebenso dient der über den ISARIA-Sensor ermittelte N-Versorgungszustand als Datenquelle für das Bewässerungsmodell. Die VIs des ISARIA-Sensors leisten hierbei einen Beitrag zur Abschätzung der dynamischen Pflanzenentwicklung, wodurch die Notwendigkeit der Eingabe von Kc-Werten entfällt und die Automatisierbarkeit erhöht wird. Während sich die VIs als geeignet zur Abschätzung des N-Versorgungszustands von Blattgemüse wie Spinat erwiesen haben, konnte der Wasserversorgungszustand bzw. -bedarf allein durch VIs nicht ausreichend erfasst werden. Die Arbeitsergebnisse wurden veröffentlicht[2] und gingen auch in Veröffentlichungen der Projektpartner ein. Zwei Praxisbetriebe, Fa. Voll GbR in Bobenheim-Roxheim und Fa. Haas in Lampertheim-Rosengarten, wurden mit online-Sensoren von FMU ausgestattet und über die Projektlaufzeit hinweg technisch betreut.

[2] Eichlseder, M. (2022): Projekt GeoSenSys Teil 2. Teilflächenspezifisch bewirtschaften sichert Erträge und spart Kosten. In: Gemüse 58 (6), S. 21–22.

II. Eingehende Darstellung

1. Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Arbeiten

Die Aufgaben von FMU im Forschungsprojekt „GeoSenSys“, Teilprojekt 5, bestanden darin,

- Sensorsysteme für die Erfassung von Spektraldaten zur Abschätzung des Pflanzenernährungszustands und ggf. des Wasserbedarfs bereitzustellen,
- das Personal auf den Versuchsbetrieben (HGU, DLR) und auf den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben in die Sensortechnik, in den Anbau am Trägerfahrzeug und in die Bedienung, speziell zur Datenaufzeichnung, einzuweisen und zu unterstützen
- auf den Versuchsanlagen der Projektpartner und auf den Praxisbetrieben Daten mit dem ISARIA-Sensor zu erheben und Kalibrierkurven für eine optimierte Düngung und Bewässerung zu erstellen
- gemeinsam mit GID eine Schnittstelle zu entwickeln, die es erlaubt, die Sensordaten in die Dünge- und Bewässerungsmodelle der Projektpartner zu integrieren
- FMU’s pflanzenbauliche Expertise in die Anlage der Versuche (Parzellenversuche, Praxisversuche) und in die Interpretation der Daten einzubringen, um wissenschaftlich fundierte Ergebnisse zu erhalten, die auch den zu erwartenden Praxisverhältnissen Rechnung tragen
- den kommerziell verfügbaren Sensor so zu modifizieren, dass damit zusätzlich Indices generiert werden können, die die aktuelle Wasserversorgung der Pflanzen beschreiben
- durch die Erhebung und Bereitstellung realer Sensordaten die Dünge- und Bewässerungsmodelle der Projektpartner zu validieren.

Es wurden im Teilprojekt 5 (FMU) alle geplanten Arbeitspakete (AP) bearbeitet und die für den Projekterfolg erforderlichen Meilensteine (Ms) erreicht. Die APs des Teilprojektes 5 umfassen AP2, AP3 und AP4, in welchem Bewässerungs- und N-Düngeversuche an Spinat durchgeführt und Boden- und Pflanzenparameter gemessen werden und AP 11, das Proof of Principle, in welchem GeoSenSys unter Praxisbedingungen getestet und evaluiert wird.

In mehreren Projekt-Treffen wurde der jeweils aktuelle Status der Bearbeitung dargestellt und das weitere Vorgehen besprochen:

- 2020: Teilnahme an Projekttreffen, 5 virtuellen online-Meetings, Treffen mit einzelnen Projektpartnern (HGU, DLR)
- 2021: Teilnahme an Projekttreffen und 5 virtuellen online-Meetings
- 2022: Teilnahme an Projekttreffen und an 8 virtuellen online-Meetings

- 2023: Teilnahme an 7 online-Meetings
- 2024: Teilnahme an 3 online-Meetings

Die ursprünglich in der Skizze beantragten Projektmittel für eine Sensorentwicklung zur Bestimmung des Pflanzenwassergehalts waren eingekürzt worden, so dass eine low-cost-Lösung verfolgt wurde, die anstelle einer Neuentwicklung lediglich die Modifikation der bereits vorhandenen ISARIA-Sensorik vorsah. Diese wurde hard- und softwaremäßig so angepasst, dass damit über die Analyse der kurzwellige Wasserabsorptionsbande der Pflanzenwasser-gehalt von Spinat, wie in der Literatur angegeben[3], abzuleiten wäre.

Diese Vorgehensweise führte aufgrund der geringen radiometrischen Empfindlichkeit des verwendeten Spektrometers im relevanten Wellenlängenbereich nicht zum Ziel.

FMU führte daraufhin weitergehende Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten, die über den Rahmen der beantragten Projektfördermittel hinausgingen, auf eigene Kosten durch. So beispielsweise vorbereitende Arbeiten zur Entwicklung eines Wasserstresssensors, der nicht nur den Standardwellenlängenbereich, sondern zusätzlich den Spektralbereich des nahen Infrarotlichtspektrums zur Erkennung von markanteren Wasserabsorptionsbanden abdeckt, und die Erprobung einer Prototypen-Multispektralkamera zur Erkennung von Wasserstress.

Aufgrund der Corona-bedingten kostenneutralen Verlängerung des Projektes wurden im Jahr 2023 keine Fördermittel abgerufen. Trotzdem hat FMU für das GeoSenSys-Projekt in diesem Jahr auf eigene Kosten gearbeitet und die für den Projekterfolg erforderlichen Leistungen, die in erster Linie die Partner in der Abarbeitung ihrer Arbeitspakete unterstützten, erbracht.

AP1: Teilflächenspezifische Bodenkartierung und Georeferenzierung der Versuchs- und Praxisflächen (IGZ, GID)

Dieses Arbeitspaket wurde von den Projektpartnern IGZ und GID bearbeitet und wird in den jeweiligen Abschlussberichten erläutert. Allerdings wurden die Projektpartner auch hier unterstützt, indem vorhandene Parzellenpläne am Standort Queckbrunnerhof in ein georeferenziertes Datenformat gewandelt wurden, so dass zu Projektbeginn nach einem manuellen Datenimport eine Zuordnung der ISARIA-Scandaten zu den jeweiligen Parzellen in digitalisierter Form möglich war.

[3] Penuelas, J., Filella, I., Biel, C.: The Reflectance at the 950-970nm Region as an Indicator of Plant Water Status. International Journal of Remote Sense 14, 1887-1905 (1993)

AP2: Schnittstellenentwicklung zwischen dem ISARIA Portal und dem GID Portal (GID, FMU, DLR)

Für die Integration der ISARIA Scan-Dateien in das Entscheidungshilfesystem GeoSenSys wurde in Zusammenarbeit mit dem GID eine API-Schnittstelle zwischen dem ISARIA Connect-Portal und dem GeoSenSys-Portal programmiert. Die Datenübermittlung über diese Schnittstelle erfolgt mittels JWT (JSON Web Token) im Header des API-Aufrufes. Der Download von ISARIA-Daten erfolgt per Angabe von Feldgrenzen als geoJSON im Body des GET-Aufrufes. Der Key „uid“ im Body des GET-Aufrufes ist optional und steuert die Rückgabe von Daten, er kann folgende Werte aufweisen:

- [nicht angegeben]: Rückgabe von Metadaten zu allen ISARIA-Daten, die für das Feld vorhanden sind (inkl. Einer UID pro Datensatz)
- -1: Rückgabe von allen ISARIA-Daten, die für das Feld vorhanden sind.
- [spezifische UID]: Angabe einer UID (aus einem Aufruf ohne „uid“) zur Rückgabe von spezifischen ISARIA-Daten für das angegebene Feld.

Für die Rückgabe aller Metadaten gibt es einen GET-Aufruf: der Header enthält die Daten zur „authorization“. Parameter wie die ISARIA-ID werden als „isariald“ übermittelt, und im Body liegt die „geoJSON“-Datei der Feldgrenzen in WGS84 Projektion. Die Antwort auf die API erfolgt bei Autorisierung, „Status 401“ bei nicht autorisiertem Zugriff oder fehlenden Informationen. Bei Erfolg werden alle Daten im JSON-Format zurückgegeben.

Das Fremdunternehmen Fa. green spin GmbH (https://www.greenspin.de) übernahm den FE-Auftrag für die Integration der API-Schnittstelle in das ISARIA-Portal.

AP3: Ermittlung spektraler VIs und Bodensaugspannungs-Schwellen für Bewässerungs-Steuerung (FMU, DLR, HGU)

Zur zerstörungsfreien Abschätzung des Wasserversorgungszustands von Freilandgemüse-kulturen auf der Grundlage von VIs wurden in vierjährigen Experimenten von 2020 bis 2023 an zwei Standorten in Deutschland, Geisenheim und Schifferstadt, insgesamt 18 Freilandversuche mit den drei Spinatsorten 'Solomon', 'Antigua' und 'Caladonia' (Seminis, Langenfeld, Deutschland) durchgeführt. Die zweifaktoriellen Versuche umfassten unterschiedliche Bewässerungs- und N-Düngungsbehandlungen (Tabelle 1). Die spektrale Reflexion der Bestände wurde mit ISARIA-Sensoren gemessen. Die Projektpartner verwendeten für die Messungen diverse Spektrometer und Messgeräte weiterer Hersteller (vgl. Abschlussbericht HGU).

Tabelle 1 *Behandlungen der zweifaktoriellen Freilandversuche mit den Faktoren Stickstoffdüngung (N) und Bewässerungsregime an zwei Standorten in Deutschland (G = Geisenheim, S = Schifferstadt. Die Bewässerungsmengen beziehen sich auf reduzierte (Wred), optimale (Wfull) und erhöhte (Wplus) Wasserversorgung, basierend auf Kc-Werten. Die N-Mengen beziehen sich auf die empfohlene N-Versorgung nach Feller und Fink (2002), mit optimaler (Nfull, 100 %), reduzierter (Nred, 80 %) und keiner (N0, 0 %) N-Versorgung (Quelle: Abschlussbericht HGU).*

Nummer Behandlung	**Faktoren**		**Code**	**Standort**
	N Versorgung Name | kg N ha^{-1}	**Bewässerung**		
1	Nfull | 190	Wplus	Nfull_Wplus	G, S
2	Nfull | 190	Wfull	Nfull_Wfull	G, S
3	Nfull | 190	Wred	Nfull_Wred	G, S
4	Nred | 152	Wplus	Nred_Wplus	S
5	Nred | 152	Wfull	Nred_Wfull	G, S
6	Nred | 152	Wred	Nred_Wred	S
7	N0 | 0	Wplus	N0_Wplus	S
8	N0 | 0	Wred	N0_Wred	S

Arbeiten an der Entwicklung eines „Wasserstress-Sensors“

1) Untersuchungen nach GeoSenSys-Projektplan

Wie anfangs erwähnt, erlaubten die begrenzten Fördermittel keine Neuentwicklung eines Sensors mit erweitertem Spektralbereich zur berührungslosen Bestimmung des Pflanzenwassergehalts. So wurde im Frühjahr 2020 der Prototyp eines modifizierten ISARIA Handgerätes entwickelt, mit dessen integriertem Standardspektrometer und deshalb eingeschränktem Wellenlängenbereich es laut Literatur möglich sein sollte, die kurzwellige Wasserbande im NIR-Bereich bei ca. 950 nm zu detektieren. Es sollte herausgefunden werden, ob damit auch Indices zur Bestimmung von Wasserstress bzw. zur Erkennung des Wasserversorgungszustands von Freilandgemüse zu erheben möglich wäre. Grundlage für diese Idee waren Literaturrecherchen und interne Messungen mit handelsüblichen full-range-Spektrometern der Firmen Hamamatsu Photonics und Spectral Evolution (Abbildung 1).

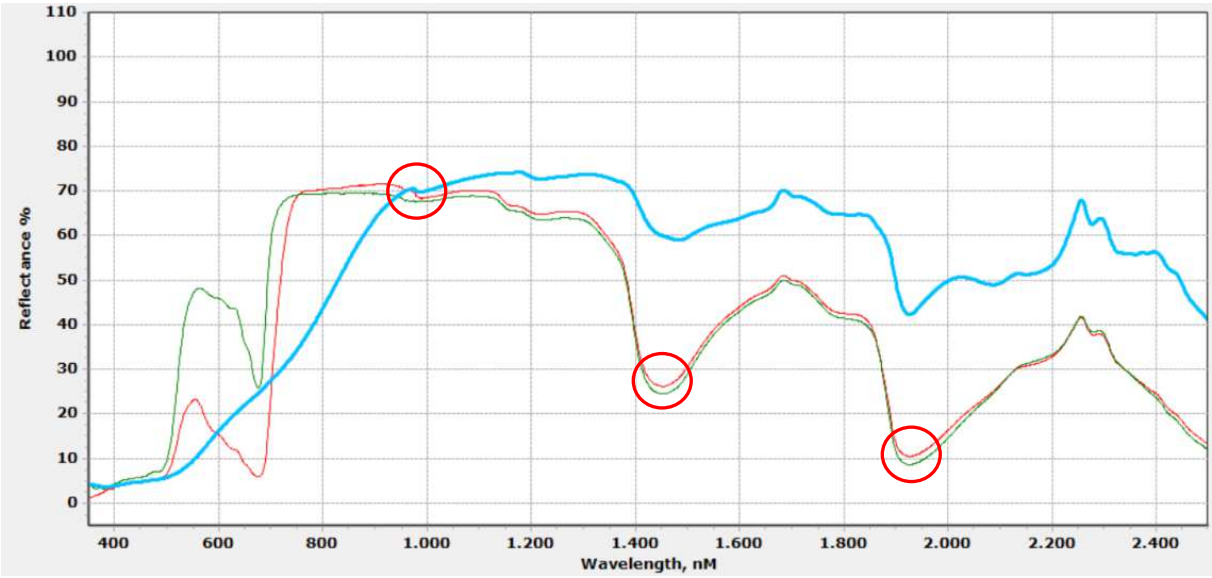

Abbildung 1: Spektrale Signatur Pflanzenblätter Baum, von a) Blatt, noch relativ grün (rote Kurve), b) Blatt, schon leicht herbstlich gefärbt (grüne Kurve) und c) Blatt, braun, schon abgefallen, am Boden liegend (blaue Kurve). Gemessen mit Spektrometer Spectral_Evolution.

Es gibt im Gesamtspektrum VIS, NIR, SWIR[4] zwei festgelegte Wasserabsorptionsbanden. Eine Wasserbande befindet sich bei ca. 1450 nm und eine Bande liegt bei ca. 1920 nm. Einige Veröffentlichungen und Publikationen beschreiben eine dritte, schwächere Wasserbande bei ca. 950 nm[5,6]. In Abbildung 1 ist diese als kleiner Peak bei ca. 950 nm sichtbar. Der Prototyp „Wasserstress-Sensor“ wurde auf die beschriebene Wasserbande bei ca. 950 nm hin optimiert. Dieser Wellenlängenbereich sollte mit dem bestehenden Spektrometer, das bis dato für die Chlorophyll-Messung verwendet wird, noch erfassbar sein. Die Datenerhebung mit solch einem Sensor sollte als Grundlage für die Steuerung einer teilflächenspezifischen Bewässerung, wie sie im GeoSenSys-Projekt entwickelt werden sollte, dienen.

Das entsprechend modifizierte Handgerät wurde am Queckbrunnerhof beim zweiten Spinatsatz im Sommer 2020 eingesetzt. Die Datenauswertung zeigte, dass die erhobenen Daten stark streuten und daher nur sehr schwach mit dem im Labor ermittelten Wassergehalt des Pflanzenbestandes korrelierten. Eine Ursache hierfür liegt in der geringen Detektor-empfindlichkeit des Prototyps in diesem Wellenlängenbereich

[4] Nach https://opg.optica.org erstrecken sich die Spektralbereiche visible (VIS: 400 nm – 700 nm) near-infrared (NIR: 700 nm – 1000 nm) und shortwave infrared (SWIR: 1000 nm – 2500 nm).
[5] Penuelas, J., Filella, I., Biel, C.: The Reflectance at the 950-970nm Region as an Indicator of Plant Water Status. International Journal of Remote Sense 14, 1887-1905 (1993)
[6] Jones, C. L.; Weckler, P. R.; Maness, N. O.; Stone, M.L.; Jayasekara, R. (2004): Estimating Water Stress in Plants Using Hyperspectral Sensing, ASAE/CSAE Annual International Meeting, 2-11

2) Untersuchungen zur Entwicklung eines Spektrometers mit erweitertem Spektralbereich

Aufbauend auf oben genannter Erkenntnis wurden Spinatmessungen am Standort der Fritzmeier Umwelttechnik (Großhelfendorf) mit einem handelsüblichen Spektrometer der Firma Hamamatsu Photonics, das über einen bis in den SWIR-Bereich erweiterten Spektralbereich verfügt, durchgeführt. Damit wurden Indices aus der Literatur getestet und es kristallisierten sich zwei Indices heraus, die gut mit dem im Labor ermittelten Pflanzenfeuchtigkeitsgehalt korrelieren.

Die Ergebnisse wurden vergleichend mit dem Projektpartner HGU, der seinerseits die vorliegenden Pflanzenbestände mit diversen optischen Messgeräten untersuchte, Reflexionsspektren erhob und analysierte, hinsichtlich der Verwendbarkeit als Indikator für Wasser- und N-Versorgung diskutiert. Wie im Abschlussbericht von HGU näher erläutert, nutzte HGU die Partial Least Squares Regression (PLSR) in Verbindung mit Competitive Adaptive Reweighted Sampling (CARS), um die Auswahl optimaler Wellenlängen für die VIs zu treffen[7]. Auch hier wurde eine hohe Variabilität der Wasser-VIs, insbesondere bei der bei Wellenlängen im Bereich von 950 nm, festgestellt. Als Ursache hierfür wurde die Veränderung der Blattstruktur ausfindig gemacht, die bei Spinat durch Wassermangel induziert wird. Diese, in Kombination mit der geringen Empfindlichkeit des Spektrometers, erklärt somit die schlechte Korrelation der mit der ISARIA-Sensormodifikation gemessenen Daten und dem Wasserindex.

Diese Erkenntnisse führten dazu, die Vorarbeiten für die Entwicklung eines ISARIA-Sensors mit erweitertem Spektralbereich einzuleiten, mit welchen die Reflexionen der Wellenlängen zur Berechnung der vorbestimmten beiden Indices bestimmt werden können. Die Arbeiten hierzu umfassten die Konzeption von Optik- und Elektronikdesign, die Material- und Komponentenauswahl (die optischen Komponenten, Lichtquellen und Detektoren erfordern Materialien, die im SWIR-Bereich geeignete Eigenschaften aufweisen und sich von VIS-Komponenten unterscheiden) und optische Strahlengangsimulationen zur Leistungs-optimierung. Die Untersuchungen und Entwicklungen sind derzeit noch nicht abgeschlossen.

Die beiden beschriebenen Indices wurden bereits bei den Spinatmessungen der Fritzmeier Umwelttechnik mit geeigneten Standardspektrometern unter Laborverhältnissen geprüft. Sie korrelieren gut mit der tatsächlichen laboranalytisch ermittelten Feuchte und sind sehr tolerant in Bezug auf variierende Bodenfeuchte und Tau.

[7] Rubo, Samantha; Zinkernagel, Jana (2022): Exploring hyperspectral reflectance indices for the estimation of water and nitrogen status of spinach. In: Biosystems Engineering 214, S. 58–71. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.12.008.

3) Untersuchungen mit einer Multispektral-Kamera

Eine weitere Option, den Wasserbedarf von Pflanzen zu bestimmen, wurde mit einer Multispektralkamera geprüft. Diese Prototypen-Ausführung (Leihgabe einer Fremdfirma) ist zwar auch auf den ISARIA-Sensor-Spektralbereich eingeschränkt. Allerdings erhoffte man sich durch die zusätzlich bildhafte Information der Pflanzenblätter, durch die Erfassung der Blattform und Blattstruktur auf Zusammenhänge mit dem aktuellen Wasserbedarf schließen zu können, da Spinat auf Trockenstress mit einer morphologischen Anpassung der Blätter reagiert.

Abbildung 2: Messung der Referenzplatte.

Abbildung 3: Messung Vegetation (Wiese).

Die Untersuchungen, die bei FMU durchgeführt wurden, erfolgten im direkten Vergleich mit einem ISARIA-Sensor. In einem ersten Versuch wurde eine grün gefärbte Referenzplatte als Target verwendet (Abbildung 2), die einen spektralen Reflexionsverlauf zeigt ähnlich dem von Vegetation. In einem zweiten Versuch wurde die Messung an einer grünen Wiese durchgeführt (Abbildung 3).

In einem dritten Schritt wurde im Hause FMU ein eigener Spinatversuch angelegt, der regelmäßig mit beiden Geräten zeitgleich detektiert wurde. Im zweifaktoriellen Aufbau wurde in drei Stufen die Bewässerung (0, ltr., 0,5 ltr., 0,8 ltr. pro Kiste) variiert und in zwei Stufen die Düngung (Nulldüngung; 80 kg N/ ha) = 0,002 kg N pro Kiste (60 cm x 40 cm)). Eine Parzelle stellte in diesem Versuch eine Pflanzkiste dar, in der die Spinatsetzlinge gezogen wurden. Die Bilder der Multispektralkamera wurden co-registriert und intensitätskorrigiert (einfacher Weißplattenabgleich mit Sonnenspektrum ohne Dunkelstromabzug (Abbildung 4 und Abbildung 5)).

Technisch funktioniert die Kamera bis auf leichtes Übersprechen zwischen den Kanälen an den Bildrändern (Streulicht) sehr gut. Da alle Bilder der einzelnen Kanäle auf einem einzigen

Kamera-Chip abgebildet werden, kann nur eine „mittlere“ Belichtungszeit gewählt werden, die für alle Bereiche (d. h. Einzelkanalbilder) auf dem Chip gilt. Für Messungen im Bereich der „roten Kante“ ist dies extrem ungünstig, da gerade hier die Vegetation sehr hohe Unterschiede in der Reflexion aufweist. Während im roten, bei einer Wellenlänge von 670 nm, die Reflexion z. T. unter 5% liegt, kann sie im nahen Infrarotbereich bis zum 15-fachen betragen (Abbildung 1), was bei einheitlicher Belichtungszeit zu Unterbelichtung bzw. zu Übersteuerung in den entsprechenden Spektralkanälen führen kann.

Zudem wird die Kamera in der Praxis in einem gewissen Abstand über dem Bestand bewegt. Die optimale Belichtungszeit bei sonnigem Wetter mit 3 Millisekunden ist zu lang, um beispielsweise mit 3 m/s (ca. 10 km/h) am Schlepper montiert über das Feld zu fahren. Bei 1 Pixel/ mm ergibt sich innerhalb der Belichtungszeit bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 3 m/s ein Versatz von 3 m/s * 3 mm pro m/s = 9 mm. Dies entspricht einer Größe von 9 Pixeln der Multispektralkamera, welche entsprechend verschmieren. Der Sensor müsste entsprechend angepasst werden (geringere Auflösung und dafür kürzere Belichtungszeit).

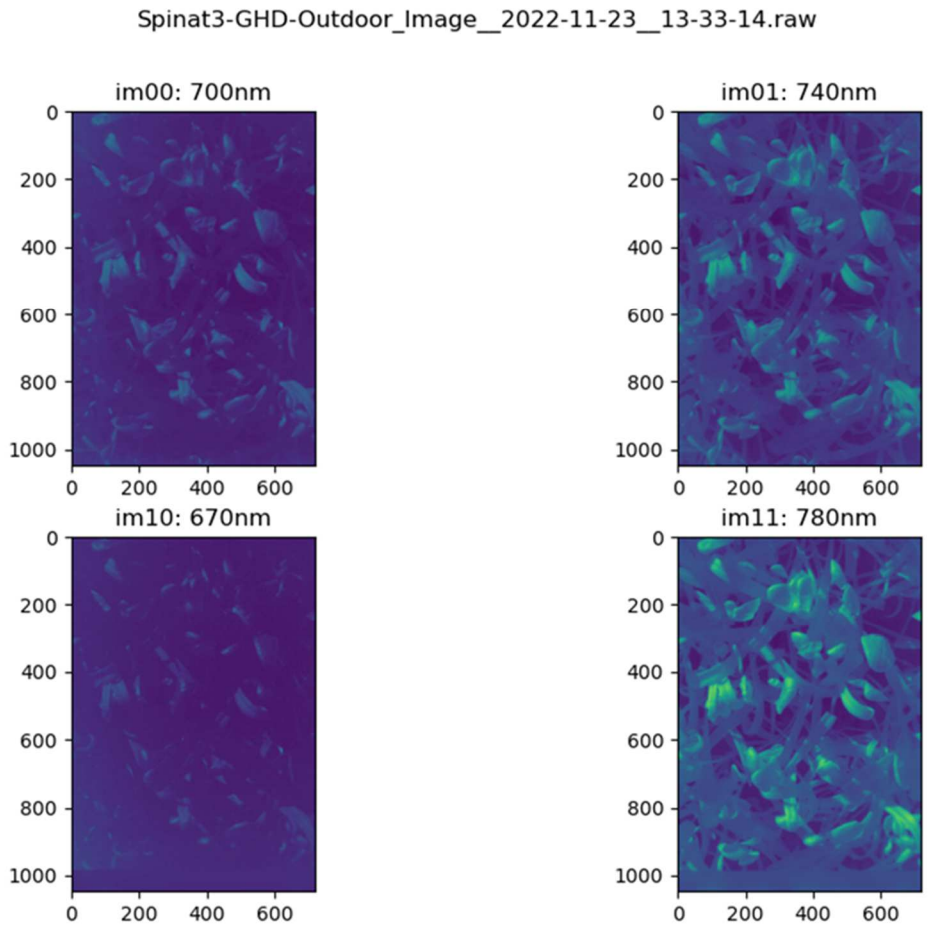

Abbildung 4: Spinat, aufgenommen mit der Multispektralkamera. Jedes Einzelbild zeigt die Reflexionscharakteristik in einem Spektralkanal: 700 nm (oben links), 740nm (oben rechts), 670 nm (unten links) und 780 nm (unten rechts).

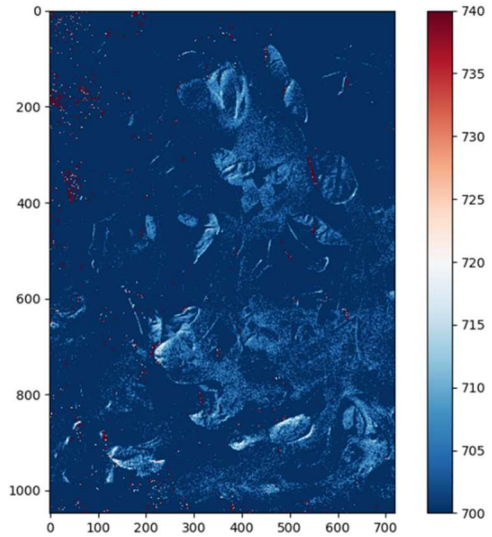

Abbildung 5: Pixel-co-registriertes Bild aus der Überlagerung der 4 Einzelbilder. Jedes Pixel ist mit dem Wert des red edge inflection point (REIP) belegt und gemäß der Legende farbcodiert.

4) Fazit

Obwohl das Ziel, den Wasserstatus der Pflanzen mit der zu Projektbeginn geplanten low-cost Spektrometerversion zu erfassen, nicht zu erreichen war, laufen seit dieser Erkenntnis Anstrengungen, ein Konzept für eine geeignete Sensorvariante zu entwickeln. Das Multi-Spektral-Kamerasystem mit fester Blende und einheitlicher Belichtungszeit der verschiedenen Spektralkanäle bei Freilandmessungen erwies sich als nicht geeignet. Die Untersuchungen der HGU zeigten allerdings, dass es vorteilhaft sein kann, für die frühzeitige Detektion von Wassermangel die Blattstruktur als Indikator zu verwenden. Spinat reagiert auf Trockenstress empfindlich mit einer morphologischen Anpassung der Blätter selbst bei hohen relativen Wassergehalten (RWG > 85%). Unterhalb dieser Schwelle lässt sich mit veröffentlichten Wasserstress-VIs, die auf die Wasserabsorptionsbande bei 900 bis 970 nm abstellen, zwar Trockenstress signifikant identifizieren, allerdings ist unterhalb dieser Schwelle, wo die VIs mit dem RWG gut korrelieren, ein Bewässerungsmanagement für Spinat aufgrund der hier hinzunehmenden Ertragseinbußen nicht mehr sinnvoll. Somit könnte eine geeignete Kameratechnik, die die morphologische Anpassung der Spinatblätter als Reaktion auf den Wassermangel registriert, weiter zielführend sein.

Die Studien der HGU ergaben zwar, dass die Wendepunktbestimmung der „roten Kante“ im Spektralbereich von ca. 690 bis 750 nm mit dem IRMI-Vegetationsindex, wie er im ISARIA-

Sensorsystem Verwendung findet, frühen Wasserstress effektiv erkennen und zwischen den Behandlungen unterscheiden kann ($p < 0,05$), allerdings ist dies nur gegeben bei optimaler N-Versorgung der Pflanze. Mit anderen Worten, bei einer Überlagerung von Wasserstress und Stickstoffstress, lassen die Messungen keine verlässliche Differenzierung mehr zu.

Da allerdings die Untersuchungen auch zeigten, dass mit VIs, die auf SWIR-Kanälen beruhen, eine Wassermangelsituation für Spinat detektiert werden kann, wurde begonnen, an einem Optikkonzept für einen Spot-Sensor mit erweitertem Spektralbereich zu arbeiten, der es in Zukunft erlauben soll, den Wassergehalt von Kulturpflanzen genau und sicher zu bestimmen.

Die Kosten für beide oben genannten Untersuchungen *2) und 3)* trug FMU selbst, da diese im Förderantrag nicht veranschlagt waren.

Die Bodensaugspannungen wurden in diesem AP von den Projektpartnern DLR und HGU ermittelt, die Arbeiten und Ergebnisse hierzu in deren jeweiligen Abschlussberichten näher erläutert.

AP4: Ermittlung spektraler VIs zur sensorgestützten Bestandesanalyse und N-Düngung (FMU, DLR, HGU, GID)

Die in AP3 durchgeführten Feldversuche und abgeleiteten VIs für den N-Versorgungszustand wurden in AP4 weiterverwendet. Der N-Versorgungszustand und das Pflanzenwachstum wurden auf Parzellenebene durch Messungen der spektralen Reflexion mit einem ISARIA-Handgerät bestimmt. Das Gerät misst die Reflexionswerte des Pflanzenbestandes bei vier spektralen Wellenlängen (660-780 nm) und erstellt zwei VIs: den ISARIA Biomass Index (IBI) und den ISARIA Reflectance Measurement Index (IRMI), der Auskunft über die N-Aufnahme der Pflanzen gibt.

Die Messungen wurden zweimal pro Woche in Geisenheim und jede zweite Woche in Schifferstadt durchgeführt, indem entlang aller Versuchsparzellen gemessen wurde. Das Gerät wurde in einer Höhe von 80 cm über dem Boden gehalten, um die Vergleichbarkeit über die Wachstumsstadien der Pflanzen zu gewährleisten.

Die ISARIA-VIs, in Beziehung gesetzt zur tatsächlichen Stickstoffaufnahme (im Labor ermittelt), ergaben gute bis sehr gute Korrelationen und zeigen somit Veränderungen in der Pflanzenentwicklung sowie im N-Versorgungsstatus von Spinat.

Beim Betrieb im sogenannten „1-Punkt Modus“, einem Applikationsalgorithmus, welcher von den IARIA-Seriengeräten bereits erfolgreich im Getreide- und Hackfruchtanbau eingesetzt wird, muss keine N-Aufnahmekurve ermittelt werden. Die Düngung wird in Form einer

Mengenverteilung auf dem jeweiligen Schlag durchgeführt. Bis jetzt ist die Strategie der meisten Gemüsebauern, die Stickstoffdüngung bei Spinat in zwei Düngegaben aufzuteilen. Bei der einheitlichen Grunddüngung wird aber in der Praxis ein größerer Teil an Stickstoff appliziert als bei der zweiten Gabe, der Kopfdüngung. Wenn eine wirksame sensorgestützte Spinatdüngung angestrebt wird, muss ein bedeutender Anteil des Gesamt-N-Sollwerts bei der Kopfdüngung appliziert werden, um den Ertrag teilflächenspezifischen zu optimieren. Dabei kann diese eventuell etwas vorgezogen werden, um keine Stickstoffmangelerscheinungen zu provozieren.

Der Spinat wird im Regelfall ein bis zwei Wochen vor der Ernte auf Blattvergilbung untersucht. Wenn die Blätter vergilbt sind (häufig aufgrund von Stickstoffmangel), wird der Spinat als Hackspinat geerntet und erzielt somit einen niedrigeren Deckungsbeitrag als der eigentlich angestrebte Blattspinat. Mit dem ISARIA-Sensor ist es möglich, noch bevor eine Vergilbung der Blätter mit dem Auge erkennbar ist, mit einer Anpassung der Düngung möglichen Gewinneinbußen entgegenzuwirken.

Neben diesen Erkenntnissen hinsichtlich einer Anwendungsausweitung des ISARIA-Sensorsystems dienten dessen Messergebnisse den Projektpartnern HGU und IGZ als input für deren Modellentwicklung und Modellverbesserung.

Die mit dem ISARIA-Sensor ermittelten VIs boten dem Projektpartner HGU ein Werkzeug zur dynamischen Schätzung der Pflanzenentwicklung als Eingabeparameter für das neuronale Netz (ANNI) und ermöglichten so die Integration von kulturspezifischen Informationen. Die enge Beziehung zwischen dem Konzept der photothermischen Zeit (PTZ), das die Entwicklung der Spinatpflanzen beschreibt, und dem ISARIA-Daten gestützten IBI-Modell wurde in den Untersuchungen der HGU mit einem RMSE von 0,56 und einem R^2 von 0,79 bestätigt (näher ausgeführt im HGU-Abschlussbericht). Das Modell sollte bei nahezu voller Bodenbedeckung, ab einem IBI von etwa 14, angewendet werden, da die hohe Variabilität bei früheren Stadien auf die Mischkalkulation von Boden und Pflanzen zurückzuführen ist.

Während der Projektpartner HGU die ISARIA-VIs als Grundlage für die Entwicklung eines dynamischen Wachstumsmodells nutzen konnte, dienten die Sensordaten dem Projektpartner IGZ zur Verbesserung der Vorhersagen aus deren N-Expert-Düngemodell: Über den Verlauf der Vegetationsperiode unterscheiden sich die Mengen des täglich aufgenommenen Stickstoffs in den Pflanzen erheblich. In der Realität können die aufgenommenen N-Mengen von den standardisierten N-Aufnahmekurven, die im N-Expert-Modell des IGZ hinterlegt sind, abweichen. Als Ergebnis der Untersuchungen des IGZ zeigte sich, dass die Sensordaten helfen können diese Abweichungen durch Messung des aktuellen N-Versorgungszustands mit dem Standard-N-Aufnahmeverlauf abzugleichen und die Düngermenge geeignet anzupassen.

Im direkten Vergleich beschrieben die ISARIA-IRMI-Daten den N-Aufnahmeverlauf mit mehr als 40% weniger Fehler als das Temperatursummenmodell. Eine Auswertung des Standardfehlers ergab für eine Vorhersage der N-Aufnahme auf Basis von Witterungsdaten (Temperatursumme) unter Einbeziehung von Sensordaten eine signifikante Verbesserung um über 30 kg N/ha. Der mittlere relative Standardfehler lag beim gewählten Modell bei 35 kgN/ha für die Kalibrierdaten und bei 31 kgN/ha bei der Validierung (alles näher erläutert im IGZ-Abschlussbericht).

Für FMU ergibt sich aus den oben genannten Ergebnissen, dass eine Anwendungserweiterung des Sensoreinsatzes auf den Gemüsebau durchaus sinnvoll und lohnend erscheint.

AP5: Ermittlung des Einflusses von Bodenparametern auf Intensität von Mineralisierungsprozessen (IGZ)

Es wurde ein Modell zur teilflächendifferenzierten Berechnung der Mineralisierungsintensität (C und N) entwickelt, welche von der Bodentextur, -feuchte und -temperatur beeinflusst wird. Dieses Arbeitspaket wurde vom Projektpartner IGZ bearbeitet und ist in dessen Abschlussbericht erläutert.

AP6: Entwicklung und Parametrisierung des Bewässerungsmodells ANNI

Im Rahmen dieses Projekts erfolgt die Bestimmung des Bewässerungsbedarfs durch den Einsatz maschineller Lernverfahren, insbesondere künstlicher neuronaler Netze (ANN). FMU lieferte hierzu ISARIA-Vegetationsindices IBI und IRMI, Erfahrungen aus der Praxis und Input zur Datenverwaltung und Datenbearbeitung, hier speziell zur Bearbeitung teilflächenspezifischer Aspekte des Modells.

Dieses Arbeitspaket wurde vom Projektpartner HGU bearbeitet und ist in dessen Abschlussbericht erläutert.

AP7: Gemüse-spezifische Parameter in das C-N-Modell CANDY integrieren (IGZ)

Ziel war die Bereitstellung und Implementierung der erforderlichen CANDY-Inputparameter. Diese beinhalten zwei Komplexe: i) Pflanzenparameter und ii) Parameter zum Umsatzverhalten von Ernte- und Wurzelrückständen.

Dieses Arbeitspaket wurde von dem Projektpartner IGZ bearbeitet und wird in dessen Abschlussbericht erläutert.

AP8: Entwicklung und Parametrisierung des N Düngungsmodells (IGZ)

Das N-Düngungsmodell besteht aus einer Synthese aus N-Expert, CANDY und ANNI. Die berechnete Düngungsempfehlung basiert auf den folgenden Zustandsgrößen des Stickstoffhaushaltes: N-Aufnahme der Pflanzen, N-Mineralisierung und N-Auswaschung. Ein wichtiges Ergebnis, das sich aus intensiven Diskussionen mit dem IGZ ergab, bestand in der Erkenntnis, dass sich die Vorhersage der N-Aufnahme auf Basis von Witterungsdaten durch die Einbeziehung von sensorbasierten VIs signifikant verbessern lässt (vgl. AP4).

Arbeitspaket AP8 wurde vom Projektpartner IGZ bearbeitet und wird in dessen Abschlussbericht erläutert.

AP9: Programmschnittstellen und Modelle (GID)

Zur Einbindung der im Projekt genutzten externen Sensoren, Datenquellen sowie der entwickelten Modelle wurden Programmschnittstellen entwickelt.

Dieses Arbeitspaket wurde vom Projektpartner GID bearbeitet und wird in dessen Abschlussbericht erläutert.

AP10: GeoSenSys erstellen: Daten zusammenführen, visualisieren, und Handlungs-empfehlungen ausgeben

Die technische Entwicklung von GeoSenSys sowie die Gestaltung des Frontends wurden durch die Projektpartner GID durchgeführt. Die ISARIA-Integration in die Modelle wurde fortgeführt (vgl. AP 8, IGZ), um die Funktionalität und Genauigkeit der Modelle zu verbessern, auch wenn eine direkte Einbindung in die Benutzeroberfläche nicht umgesetzt wird.

Die Visualisierung und Ausgabe der Handlungsempfehlung für N-Düngung und Bewässerung wird im Abschlussbericht von GID erläutert.

AP11: Proof of Principle

Im Jahr 2023 wurde GeoSenSys im kommerziellen Spinatanbau im Rahmen des Arbeitspakets AP11 implementiert. Ziel war die Überprüfung und Validierung der praktischen Anwendbarkeit des Systems unter realen Feldbedingungen. Die Validierung des Modells ANNI

und des N-Düngungsmodells erfolgte auf nicht-parametrisierten Flächen der beiden Gemüseanbaubetriebe, Fa. Voll GbR in Bobenheim-Roxheim und Fa. Haas in Lampertheim-Rosengarten. Diese setzten GeoSenSys im Jahr 2023 bei zwei Spinatanbausätzen ein.

FMU rief für das Jahr 2023 keine Fördergelder ab. Trotzdem unterstützte FMU die Projektpartner, damit die Erkenntnisse aus dem Projekt in der Praxis umgesetzt werden konnten (ausführlich erläutert in deren jeweiligen Abschlussberichten).

Die Aufgaben von FMU umfassten, das Personal auf den Betrieben in die Bedienung der ISARIA-Sensoren einzuweisen, die Kompatibilität der Technik sowie die ISOBUS-Anbindung herzustellen und die Geräte einzustellen. Dabei erwiesen sich eine schnelle Kommunikation und personelle Betreuung als vorteilhaft. So wurde beispielsweise die Applikationskarten-einbindung auf dem John Deere task controller am John Deere Terminal 4600 vorgenommen und damit die Überprüfung der Funktionalität der GeoSensys-Modelle sichergestellt.

Die Betriebe wurden fortwährend betreut und Messungen der Spinatbestände zusätzlich mit dem ISARIA-Handgerät durchgeführt. Die Sicherstellung der korrekten Messdatenakquise mit den ISARIA-Sensoren, sowohl für die Handgeräte als auch für die traktorgetragenen Versionen, gelang ausnahmslos. Die ISARIA-Daten wurden in das ISARIA-Connect-Portal hochgeladen und über die API-Schnittstelle - diese musste nochmals an die Software-Veränderungen, die im Laufe des Projekts gemacht wurden, angepasst werden - ins GeoSenSys-Portal zur Einbindung in das Bewässerungsmodell ANNI und in das Düngemodell weitergeleitet.

Für den Projektpartner GID war es in einigen Fällen notwendig die Daten in anderen Formaten bereitzustellen. Diese Formatanpassungen wurden ebenfalls von FMU übernommen: Punkt-Daten wurden interpoliert, Rasterkarten mit absoluten ISARIA-Vegetationsindices wurden erzeugt. Sofern erforderlich, wurden die Daten in weitere Datenformate wie z. B. TIFF, shape oder TaskData umformatiert.

Für die Partner IGZ und HGU übernahm FMU die Anpassung der Architektur der Applikationskarten (korrektes Koordinatensystem, korrekte Rasterausrichtung und Rastergröße, korrekte Bezeichnung der Attribut-Spalten) und die Anpassung der Applikationskarten an die Architektur der im Projekt verwendeten landwirtschaftlichen Maschinen (z. B. bzgl. der John Deere-Architektur die RX-Benennung der Applikationskarten).

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

F0831 Gehälter: Für die Bearbeitung des Projekts waren, zeitlich abgestimmt, bis zu 6 Projektingenieure vorgesehen. Entsprechend der fachlichen Schwerpunkte, die sich aus den jeweiligen APs ergaben, wurde das Personal ihrer jeweiligen Expertise entsprechend eingesetzt. So wurden die Arbeiten zur Sensormodifikation und zur GID-Schnittstellen-entwicklung aus dem Bereich Hard- und Softwareentwicklung durchgeführt. Datenakquise, Datenauswertung, Koordination, Abstimmung mit Projektpartnern, Betreuung des Personals auf den Gemüsebaubetrieben, Durchführung der Funktions- und Praxistests und Abfassen der Berichte wurde von den jeweils dafür vorgesehenen Projektmitarbeitern erledigt. An den Projektbesprechungen und an den Telefonkonferenzen nahmen die jeweils themenzuständigen Projektingenieure teil.

F0813 Material: Die Position wurde für die Anschaffung von optischen Komponenten, die für die Anpassung des Standard-Sensors zur Detektion der Wasserbanden im NIR-Bereich erforderlich waren, verwendet.

F0823 FE-Aufträge an fremde Unternehmen: Die Fa. green spin GmbH wurde für die Integration der API-Schnittstelle in das ISARIA-Portal beauftragt.

F0847 Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen: Für die Versuchsdurchführung wurden 2 schleppergetragene ISARIA-Sensorsysteme, die auf den Gemüsebaubetrieben zum Einsatz kamen, bereitgestellt. Des Weiteren wurden auf den Parzellenversuchen des DLR und der HGU zwei ISARIA-Handgeräte zur Bestimmung der VIs eingesetzt.

F0838 Reisekosten Inland: Es entstanden Reisekosten im Zusammenhang mit Projekttreffen und mit Handgerätemessungen auf den Versuchsanlagen von DLR und HGU sowie für die Betreuung der traktormontierten ISARIA-Systeme auf den Praxisbetrieben. Weiterhin wurde das Projekt auf Gemüsebau- und Feldtagen vorgestellt.

Im Projektantrag war Geld für projektbezogene Dienstreisen vorgesehen, die aufgrund der Corona-Beschränkungen nicht wie geplant stattfinden konnten. Die Sensor-Arbeiten hingegen erforderten unvorhersehbar mehr Personalaufwand. Aus diesen Gründen erfolgte eine Umwidmung eines Teils der Reisekosten in Personalkosten.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Sowohl die Ausgaben- und Kostenplanung als auch der Zeitrahmen wurden eingehalten und in jährlichen Zwischenberichten dokumentiert. Im Verlauf des Projektes bestätigte sich, dass die geplanten Arbeiten zur Zielerreichung notwendig waren. Um die Sensordaten in die Bewässerungs- und Düngemodelle mit einfließen lassen zu können und um das GeoSenSys-Portal nutzen zu können, war die Entwicklung einer API-Schnittstelle für den Datenaustausch unabdingbar. Im Rahmen der Funktionstests und des Praxistests konnte bereits in frühen Entwicklungsphasen aufgezeigt werden, dass eine Nutzung des kurzwelligen Infrarotbereichs zur Detektion der Wasserabsorptionsbande nicht zielführend war. So konnte noch während der Projektlaufzeit nach alternativen Lösungen gesucht werden. Der abschließende Praxistest zeigte das Potential auf, sensorbasierte Strategien zur Düngung auch im Gemüseanbau einsetzen zu können. Dieser Erkenntnisgewinn war größtenteils der Zusammensetzung des Konsortiums, wie sie im Projekt gegeben war, zu verdanken.

Die Durchführung des Projekts war dem Näherkommen des anbaurelevanten Ziels zu einer ressourcenschonenden Düngung zu kommen sehr hilfreich. Es muss sich zeigen, ob die Pflanzenproduzenten ihre Anbaustrategie auf eine objektive sensorbasierte Nährstoffzufuhr umstellen werden, damit das Projektziel auch gesellschaftspolitische Anerkennung findet und die Projektergebnisse sich wirtschaftlich auszahlen.

Aus Sicht von FMU bedurfte es einer Anschubfinanzierung für das gesellschaftspolitische und anbaurelevante Ziel einer effizienteren und ressourcenschonenden Düngung. Wirtschaftliche Gewinne des Produktes sind zum einen erst zu erwarten, wenn aus zukünftigen Klima- und Ressourcenentwicklungen ein Handlungszwang für die Anbauer entsteht. Die objektive Nährstoffbemessung ist bisher nur von einer kleinen Zielgruppe innerhalb der Pflanzenproduktion umgesetzt. Der wirtschaftliche Nutzen ist an den positiven Abschluss der Forschungsarbeiten gekoppelt.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der voraussichtliche Nutzen ist im Verwertungsplan (siehe dort) näher beschrieben.

Die Übertragbarkeit der aktuell kommerziell erhältlichen Düngealgorithmen des ISARIA-Standardsystems scheinen von den bisherigen Anwendungen im Getreide- und Hackfruchtanbau auf die Modell-Anbaukultur Spinat prinzipiell übertragbar zu sein. Eine Verwertbarkeit der Ergebnisse erscheint darüber hinaus möglich durch die Weiterentwicklung der ISARIA-Düngealgorithmen hinsichtlich einer Anpassung zur Anwendung auf weitere

Gemüsekulturen. Damit besteht Aussicht diesen neuen Absatzmarkt für die sensorbasierte N-Düngung zu erschließen und damit die Projektergebnisse wirtschaftlich zu nutzen.

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen hinsichtlich der Detektion von Trockenstress mittels spektroskopischer Methoden waren einerseits ernüchternd, da sich die Nutzung der Wasserabsorptionsbande bei 950 nm, wie sie in der Literatur beschrieben war, als nicht ausreichend stabil herausstellte. Andererseits zeigten sie auch, dass der sensorermittelte N-Versorgungszustand als Datenbasis für Bewässerungsmodelle herangezogen werden kann, so dass dessen Nutzung indirekt zum Ziel führen kann. Der Untersuchungszeitraum im Rahmen des Projektes war begrenzt, so dass aktuell nicht absehbar ist, ob eine weitere Erforschung der Sensitivität bisher nicht beachteter Kanalkombinationen und Algorithmen nicht doch einen VI hervorbringt, der den Wassergehalt von Pflanzen beschreiben kann. Evtl. kann auch die Erweiterung der bis dato genutzten rein spektralen Information mit zusätzlich bildhafter Information zu Blattstruktur Aufschluss über die Wasserversorgung der Pflanze liefern. Die Anfänge hierzu wurden mit den Spektralkameraversuchen im Rahmen dieses Projekts gemacht.

Da die Prognose der zum Erntetermin im Aufwuchs von Gemüse enthaltenen N-Menge in der Praxis mit erheblicher Unsicherheit verbunden ist – hier wird Gemüse aus Vertrags- oder Marktanforderungsgründen oft schon vor dem eigentlichen Erntezeitpunkt vom Feld geholt –, würde es durchaus Sinn machen, mittels N-Sensorik die N-Aufnahme des Bestandes in regelmäßigen Abständen zu monitoren[8] und die Düngung nach den ermittelten Abweichungen vom erwarteten Wert ggf. anzupassen. Die Einführung solcher Strategien ist derzeit nicht im Fokus der Gemüseproduzenten, aber sobald gesellschaftlicher und insbesondere der Verordnungs- und wirtschaftliche Druck steigen, wird sie wahrscheinlicher werden.

Während der Projektlaufzeit hatten die FMU-Projektmitarbeiter mannigfaltige Gelegenheiten ihr Wissen zu erweitern und ihre Kenntnisse in den Bereichen Softwareentwicklung, Spektroskopie, Pflanzenwasserbedarf und Bewässerungsmodelle und teilflächenspezifische Düngerausbringung im Gemüseanbau auszubauen, welche für die Lösung zukünftiger Fragestellungen in der Landwirtschaft stetig relevanter werden.

[8] Ggf. nicht nur vom Schlepper, sondern z. B. von einem am Gießwagen montierten System aus

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden keine neuen Forschungs- oder Entwicklungsergebnisse von anderen Institutionen bekannt, die die Durchführung des Forschungsvorhabens beeinflusst hätten. Dadurch blieb die inhaltliche Relevanz der Projektziele durchgehend gewahrt.

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

Jahr	Format	Titel / Zitation
2023	Projekt-vorstellung	Präsentieren der GeoSenSys-Aktivitäten. Veranstaltung: Ökofeldtage 2023 auf dem Biohof Grieshaber & Schmid, Ditzingen-Hirschlanden. 14.-15. Juni 2023
2023	Poster	Mitarbeit am HortiCo-Poster für GeoSenSys
2022	Artikel in Fachzeitschrift	Eichlseder, Matthias (2022): Projekt GeoSenSys Teil 2. Teilflächenspezifisch bewirtschaften sichert Erträge und spart Kosten. In: Gemüse 58 (6), S. 21–22. Online verfügbar unter https://www.gemuese-online.de/magazin/archiv/article-7160715-206224/teilflaechenspezifisch-bewirtschaften-sichert-ertraege-und-spart-kosten-.html.