

Steuerung des Zusatzwassereinsatzes in der Pflanzenproduktion - Situativ,
teilschlagspezifisch und automatisiert

Precision Irrigation

Zuwendungsempfänger: Forschungsinstitut für
Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Brauhausweg 2
03238 Finsterwalde, Ansprechpartner: Dr. Michael Haubold-Rosar (Direktor),
Projektleiter Tel.: 03531-7907-11 E-Mail: m.haubold-rosar@fib-ev.de,
www.fib.ev.de

Projektkoordination: Forschungsinstitut für
Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Brauhausweg 2
03238 Finsterwalde, Ansprechpartnerin: Dr. Beate Zimmermann
(Wissenschaftliche Mitarbeiterin), Projektkoordinatorin, Tel.: 03531-7907-20,
E-Mail: b.zimmermann@fib-ev.de, www.fib.ev.de

Mitglieder der Operationellen Gruppe und assoziierte Partner:

- Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB),
Ansprechpartner: Dr. Michael Haubold-Rosar
- Fachverband Bewässerungslandbau Mitteldeutschland e.V. (FBM),
Ansprechpartner: Hans-Heinrich Grünhagen, Dr. Sebastian Ulrich
- Agrar GmbH Landwirtschaftlicher Produktionsbetrieb Altdöbern,
Ansprechpartner: Christoph Bierlein
- Grünhagen Ackerbau GmbH, Ansprechpartner: Hans-Heinrich Grünhagen
- IRRIGAMA-Projektgesellschaft Dr. Schörling & Partner,
Ansprechpartner: Dr. Bernd Schörling
- HYDRO-AIR international irrigation systems GmbH,
Ansprechpartner: Stefan Scholz

Projektlaufzeit: 08.04.2016 bis 31.12.2020 (4 Jahre 9 Monate)

Budget: 1.039.704,32 €

Datum: 25.08.2021

Autoren: Rainer Schlepphorst, Dr. Beate Zimmermann, Dr. Michael Haubold-Rosar

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung in deutscher Sprache.....	1
2	Kurzfassung in englischer Sprache.....	2
3	Situation zu Projektbeginn	3
3.1	Ausgangssituation.....	3
3.2	Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens.....	4
4	Projektverlauf	5
5	Projektergebnisse	16
5.1	Ergebnisse.....	16
5.2	Diskussion der Ergebnisse.....	29
5.3	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen	32
5.4	Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen	33
5.5	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	33
5.6	Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen	34
5.7	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen	35
6	Zusammenarbeit der operationellen Gruppe	35
7	Kommunikations- und Disseminationskonzept	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fruchtfolgen auf den Praxis-Versuchsschlägen	7
Tabelle 2: Untersuchte Bewässerungssteuerungsstrategien auf den beiden Versuchsflächen.....	11
Tabelle 3: Durchgeführte händische Erntemaßnahmen auf der Praxis- Versuchsfläche in Dahlhausen	14
Tabelle 4: Parameter zur Berechnung der Erlöse und Bewässerungskosten.....	15
Tabelle 5: Feste und variable Kosten für den Betrieb der Bewässerungsanlagen.....	15
Tabelle 6: Nutzbare Feldkapazitäten der beiden Versuchsflächen	17
Tabelle 7: Saisonale Bewässerungsmengen je Steuerungsstrategie in Dahlhausen	20
Tabelle 8: Vergleich der mittleren Trockenmasseerträge (TM) der verschiedenen Fruchtarten in den Feldversuchen in Dahlhausen unter den verschiedenen Bewässerungssteuerungsstrategien sowie für die unbewässerte Referenz (non) für die Teilschläge 1 und 3/4	23
Tabelle 9: Vergleich der mittleren realen Bewässerungsmengen der verschiedenen Fruchtarten und Bewässerungssteuerungsstrategien in Dahlhausen sowie Darstellung der Unterschiede	25
Tabelle 10: Erlöse der unbewässerten Varianten der Feldversuche in Dahlhausen.....	25
Tabelle 11: Mittlere Gesamt-Bewässerungskosten der verschiedenen Bewässerungsstrategien in Abhängigkeit von Standort und Fruchtart (Stichprobenumfang = 3 Einzelwerte je Fruchtart, Standort und Bewässerungssteuerungsstrategie).....	26
Tabelle 12: Bewässerungskostenfreie Leistungen je nach Fruchtart, Bewässerungssteuerungsvariante und Preisniveau aus den Feldversuchen auf der Versuchsfläche Dahlhausen	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der beiden Praxis-Versuchsflächen (Dahlhausen: 53.06 ° N, 23.33° E, WGS84; Schöllnitz: 51.66° N, 13.99° E)	5
Abbildung 2: Darstellung des biophysikalischen Hintergrundes zur Messung der Blatttemperaturen	8
Abbildung 3: Kameramodul als Payload am UAV-Gimbal. Das Modul ist bestückt mit einer Infrarotkamera (Flir Tau2 mit TEAX external Shutter, rechts im Bild) und einer Multispektralkamera (Mapir Survey 2, links im Bild).	9
Abbildung 4: Screenshot mit einer Steuerkurve in Irrigama steering (Beispiel Kartoffeln in Dahlhausen im Jahr 2020). oliv = Verlauf der AET, grün = optimaler Verlauf des Quotienten AET/PET (Optimalkurve), magenta = Minimalkurve des Quotienten AET/PET	12
Abbildung 5: Einzelaufnahme der Infrarotkamera vom Kartoffelbestand in Dahlhausen, 02.07.2020	18
Abbildung 6: Orthomosaik der Oberflächentemperaturen des Maisbestandes in Schöllnitz am 09.07.2018.....	19
Abbildung 7: Aktuelle Evapotranspiration am 09.07.2018 und Abgrenzung der Teilschläge auf der Versuchsfläche Schöllnitz	19
Abbildung 8: Aktuelle Evapotranspiration (links) und pflanzentemperaturbasierte kc-Faktoren (rechts) in einem Ausschnitt des Kartoffelbestandes, am 18.06.2020 auf der Versuchsfläche in Dahlhausen. Die Auslösung pro Rasterzelle beträgt 5 m.	20
Abbildung 9: Screenshot des Grunddaten-Fensters von Irrigama steering	22
Abbildung 10: Mit HERMES berechnete mittlere Erträge (TM). Gemittelt wurden jeweils 6 Einzelwerte je Bewässerungsvariante, die sich aus der Kombination von 2 Versuchsschlägen und 3 Wiederholungen pro Fruchtart ergeben.	22
Abbildung 11: Vergleich der simulierten mittleren Bewässerungssummen auf beiden Praxis-Versuchsflächen. Gemittelt wurden jeweils 6 Einzelwerte je Bewässerungsvariante, die sich aus der Kombination von zwei Versuchsschlägen und 3 Wiederholungen pro Fruchtart ergeben.	24
Abbildung 12: Vergleich der mittleren Erlöse der unbewässerten Varianten auf beiden Versuchsflächen in Abhängigkeit vom Erzeugerpreisniveau, basierend auf den Ertragsdaten der Simulation	25

Abbildung 13: Mittlere bewässerungskostenfreie Leistungen der verschiedenen Bewässerungssteuerungsstrategien in der Fruchtfolge (Stichprobenumfang = 24 Einzelwerte je Bewässerungssteuerungsvariante und Erzeugerpreisniveau)	27
---	----

Abbildung 14: Vergleich der mittleren bewässerungskostenfreien Leistung von drei untersuchten Fruchtarten in Abhängigkeit von Standortortqualität und Bewässerungssteuerungsvariante (6 Einzelwerte je Fruchtart, Teilschlag und Bewässerungssteuerungsvariante)	28
---	----

1 Kurzfassung in deutscher Sprache

Der Bewässerung in der Landwirtschaft kommt angesichts von häufigeren und länger andauernden Hitze- und Trockenperioden eine wachsende Rolle für die Sicherung von Erträgen und den Erhalt der landwirtschaftlichen Wertschöpfung zu, auch und gerade in Brandenburg. Gleichzeitig wird die Konkurrenz um die Wasserressourcen schärfer, zumal in einigen Regionen eine verringerte Grundwasserneubildung beobachtet wird. Im EIP-Projekt "Precision Irrigation" wurde daher nach Möglichkeiten gesucht, wie die Zusatzwasserversorgung landwirtschaftlicher Kulturen so sparsam und effizient wie möglich umgesetzt werden kann.

In der Operationellen Gruppe wurde vor Projektbeginn wesentliches Optimierungspotential gegenüber der bisherigen landwirtschaftlichen Bewässerungspraxis erkannt, und zwar im Hinblick auf eine teilflächenspezifische Steuerung der Zusatzwassergabe, die Einbeziehung von pflanzenbasierten Informationen zum tatsächlichen Wasserbedarf und bei der Automatisierung der gesamten Bewässerungslogistik.

Dazu wurden im Projekt intensive Untersuchungen auf zwei Praxis-Versuchsschlägen mit Kreisberegnungsanlagen in Brandenburg durchgeführt. Es wurde eruiert, inwiefern eine teilflächenspezifische Bewässerung einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz der Bewässerung leisten kann. Zur alternativen Ermittlung des Zusatzwasserbedarfs wurden Pflanzentemperaturen erfasst und mit Hilfe von Algorithmen in nutzbare Bewässerungsinformationen transformiert. Mit dem Bewässerungssteuerungsmodell Irrigama steering wurde ein modernes Entscheidungsunterstützungssystem geschaffen, mit dem eine weitgehend automatisierte und wissenschaftliche fundierte Steuerung der Bewässerung möglich ist. Mit Hilfe einer Kosten-Nutzen-Analyse konnten die effizientesten Bewässerungsstrategien unter Brandenburger Verhältnissen herausgearbeitet werden.

Ein wesentliches Ergebnis ist, dass eine teilflächenspezifische Bewässerung in Brandenburg unter den derzeitigen Bedingungen ökonomisch nicht sinnvoll erscheint. Zudem ist ein Wasserspareffekt dieser Variante unter den gegebenen Standortbedingungen nicht erkennbar. Dagegen erweist sich eine gleichmäßige Bewässerung mit reduzierter Wassergabe als effizient, insbesondere bei der Bewässerung von Winterweizen. Die Einbeziehung von pflanzenbasierten Informationen in die Bewässerungssteuerung ist unter den derzeitigen technischen Rahmenbedingungen noch nicht praxisreif, obwohl vielversprechende Ansätze erarbeitet werden konnten. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, denn das Wassersparpotential solcher Verfahren konnte im Projekt ansatzweise bestätigt werden. Die Projektergebnisse wurden in breiter Form kommuniziert und stehen Anwendern von Bewässerungstechnik zur Verfügung.

2 Kurzfassung in englischer Sprache

In view of more frequent and longer-lasting heat and dry periods due to the climate change, irrigation in agriculture is playing an increasing role in securing yields and maintaining agricultural value creation, also and especially in Brandenburg.

At the same time, competition for water resources is becoming fiercer, especially as reduced groundwater recharge is observed in some regions. The EIP project "Precision Irrigation" therefore looked for ways to implement the supplementary water supply for agricultural crops as economically and efficiently as possible. Before the start of the project, the operational group identified significant potential for optimization compared to previous agricultural irrigation practice, specifically with regard to site-specific control of the additional water supply, the inclusion of plant-based information in the calculation of actual plant water requirements, and the automation of the entire irrigation logistics.

For this purpose, intensive investigations were carried out on two practical demonstration fields with center pivot irrigation machines in Brandenburg. It was determined to what extent site-specific irrigation may contribute to increase the efficiency of irrigation. As a plant-based component of the irrigation control, plant temperatures were recorded and transformed into usable irrigation information. In addition, with the irrigation control model Irrigama steering, a modern decision support system was created, which enables a largely automated and scientifically sound control of irrigation. With the help of a cost-benefit analysis, the most efficient irrigation strategies were identified.

One of the main results is that area-specific irrigation in Brandenburg does not seem economically sensible under the current conditions. In addition, a water-saving effect of this strategy is not discernible under the given site conditions. In contrast, uniform irrigation with reduced water amounts has been proven to be efficient, especially when irrigating winter wheat. The inclusion of plant-based information into irrigation control is not yet ready for practice under the current technical framework, although promising approaches have been developed. There is a need for further research because the water-saving potential of such approaches could be confirmed to some extent in the project. The project results have been widely communicated and are available to users of irrigation technologies.

3 Situation zu Projektbeginn

3.1 Ausgangssituation

Die landwirtschaftliche Feldbewässerung dient zur Sicherung und Steigerung von Erträgen der angebauten Kulturen. Sie erhält in Brandenburg mit seinen trocken-heißen Sommern und der mittlerweile regelmäßig auftretenden Frühsommertrockenheit eine zunehmende Bedeutung, denn bereits in „Normaljahren“ wirkt das Wasserdargebot ertragslimitierend. Viele Landwirtschaftsflächen in diesem Bundesland sind geprägt durch sandige bis mäßig bindige Substrate. In Brandenburg werden Feldkulturen auf insgesamt etwa 24.400 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche bewässert (entspricht 1,85 % der LN-Fläche, Stand 2015; Statistisches Bundesamt, 2017). Großflächenregner, d. h. Kreis- oder Linearberegnungsanlagen, teilen sich die beregnete Fläche mit anderen Bewässerungstechnologien, insbesondere Trommelregnern (Schlepphorst et al., 2020).

Die Steuerung der Bewässerung, also die Bestimmung des optimalen Zeitpunktes und der optimalen Gabenhöhe, basiert in der Praxis häufig ausschließlich auf Erfahrungswerten und subjektiver Einschätzung. Auf Grund der komplexen Beziehungen zwischen Witterung, Bodenzustand und pflanzenphysiologischem Wasserbedarf sind damit Fehleinschätzungen unvermeidlich. Entscheidungsunterstützungssysteme (kurz EUS) für eine wissenschaftlich fundierte Bewässerungseinsatzsteuerung tragen dieser Komplexität Rechnung, indem neben dem Wasserbedarf der Pflanzen beispielsweise auch das vorhandene Wasserdargebot im Bodenspeicher berücksichtigt wird. Diese Systeme verbessern die Effektivität des Zusatzwassereinsatzes deutlich (Simon & Engel, 1986). Zur Bewässerungssteuerung in einigen Landwirtschaftsbetrieben wurde vor Projektbeginn das in der ehemaligen DDR entwickelte Modell BEREST als Entscheidungsunterstützungssystem verwendet. Diese Software basierte auf einem PASCAL-Code, musste täglich per Hand mit Niederschlagsdaten versorgt werden und verfügte nicht über eine moderne grafische Benutzeroberfläche. Der Einsatz von BEREST war deshalb kompliziert, zeitaufwändig und nicht intuitiv. BEREST wurde insbesondere in der kommerziellen Bewässerungsberatung eingesetzt. Die Ausgaben des Programms mussten telefonisch oder per Fax an die Betriebe kommuniziert werden.

Bei bestehendem Zusatzwasserbedarf erfolgt i. d. R. eine gleichmäßige und ausreichende Bewässerung des Gesamtschlages, welche durch die gängige Beregnungstechnologie gewährleistet wird. Auf den großen Brandenburger Ackerflächen sind Standort- und Wachstumsbedingungen jedoch nicht immer homogen, weshalb es bei einheitlicher Zusatzwassergabe zu einer Über- bzw. Unterversorgung einzelner Teilflächen kommen kann. Dies befördert ggf. einen unproduktiven Mehrverbrauch an Wasser und Energie sowie negative Umweltauswirkungen wie Bodenerosion oder erhöhte Nährstoffausträge. Technisch

ist eine Einzelansteuerung der Düsen von Großflächenregnern zwar möglich, wurde bisher jedoch kaum in der Bewässerungspraxis, weder in Brandenburg noch in anderen Bundesländern eingesetzt. Der Grund für diese Zurückhaltung sind die hohen Investitionskosten für das erforderliche Zusatzequipment, zudem der ökonomische Nutzen dieser Technologie bisher weitgehend unklar war. Die teilflächenspezifische Bewässerung erfordert zudem eine weitgehende Automatisierung bei der Steuerung und Überwachung der Bewässerungsanlage.

3.2 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Das Projektziel war die Entwicklung einer anwenderfreundlichen, wirtschaftlichen und automatisierten Lösung der teilflächenspezifischen und jederzeit bedarfsgerechten Präzisions-Bewässerung. Daraus ergaben sich folgende konkrete Aufgabenstellungen:

- Durchführung der teilflächenspezifischen Bewässerung zur Ermittlung des Wasserspareffekts und wirtschaftlichen Nutzens. Neben der Erfassung der raumzeitlichen Heterogenität im Boden und im Pflanzenbestand auf den beiden Praxis-Bewässerungsschlägen waren dazu technische Veränderungen an den Bewässerungsanlagen erforderlich.
- Einbeziehung von pflanzenbasierten Informationen zum tatsächlichen Wasserversorgungszustand der Kulturen in die Bewässerungsempfehlung. Ausgangspunkt war der aktuelle Stand von Forschung und Entwicklung im Bereich der berührungslosen Erfassung der Pflanzentemperatur mit Infrarot-Thermographie.
- Überführung des Bewässerungssteuerungsmodells BEREST in eine moderne, bedienerfreundliche Webanwendung, welche die Bewässerungsempfehlung dem Landwirt weitgehend automatisiert berechnet und übermittelt.
- Zusammenfassende Bewertung der Wirtschaftlichkeit der getesteten Bewässerungsstrategien.

4 Projektverlauf

Festlegung von Bewässerungsschlägen und Berechnungsfruchtfolgen in den beiden Praxisbetrieben, Erfassung der lokalen Bodeneigenschaften und bodenhydrologisches Monitoring

Zwei Praxis-Versuchsflächen wurden als typische Bewässerungsschläge intensiv im Projekt untersucht. Von der *Agrar GmbH Landwirtschaftlicher Produktionsbetrieb Altdöbern* wurde ein Schlag bei Schöllnitz (03229 Luckaitztal) und von der *Grünhagen Ackerbau GmbH* eine Fläche bei Dahlhausen (16928 Heiligengrabe) zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Lage der beiden Praxis-Versuchsflächen (Dahlhausen: 53.06 ° N, 23.33° E, WGS84; Schöllnitz: 51.66° N, 13.99° E)

Beiden Flächen wurden durch die Betriebe eine Heterogenität in den Standortbedingungen attestiert, die eine teilflächenspezifische Bewässerung überhaupt erst rechtfertigt. Auf den ausgewählten Schlägen wurden als Voraussetzung für eine fundierte Ermittlung des teilflächenspezifischen Zusatzwasserbedarfs Teilbereiche abgegrenzt (sogenannte Managementzonen, MZ), die dann separate Zusatzwassergaben erhalten sollten. Der Fokus lag in Anlehnung an das international übliche Vorgehen auf dem Bodenwasserspeichervermögen, welches sich mit dem Parameter nutzbare Feldkapazität (nFK) beziffern lässt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- Vorab-Sondierung der Bodenheterogenität mit einer geoelektrischen Kartierung des scheinbaren elektrischen Widerstands in sechs Tiefenstufen (0 - 25 cm, 0 – 50 cm, ..., 0 – 150 cm). Dieser Parameter wird hauptsächlich von der aktuellen Bodenfeuchte

beeinflusst und korreliert mit Bodeneigenschaften wie Textur und Feldkapazität. Zum Einsatz kam dabei der *GEOPHILUS*, ein mobiles Messsystem, das von einem Fahrzeug in regelmäßigen Gassenabständen (hier 15 m) über die Bodenoberfläche gezogen wird (Lueck & Rühlmann, 2013) und Messungen durch Elektroden im Abstand von jeweils 3 m durchführt.

- Entwicklung eines geeigneten Beprobungsschemas für die nachfolgende Bodenkartierung mit Hilfe der *GEOPHILUS*-Daten.
- Bodenbeprobung und Ableitung der Managementzonen:

(1) Die Bodenheterogenität auf dem Versuchsschlag in Schöllnitz ist durch einen Wechsel zwischen reinen Sandstandorten und Bereichen mit einer Stauschicht ("Tieflehm") gekennzeichnet. Daher bot die räumliche Verteilung dieser Stauschicht einen naheliegenden und leicht zu ermittelnden Indikator zur Abgrenzung der Managementzonen, zumal ein Einfluss der Stauschicht auf das Wachstum der im Jahr 2016 auf dem Schlag angebauten Zuckerrüben erkennbar war. Die Erfassung erfolgte mit Bohrstockkartierungen, für die Pürckhauer mit einer Einschlaglänge von 1 m verwendet wurden ($n = 231$). Die Zielvariable ist entsprechend das Vorhandensein der Stauschicht im oberen Bodenmeter.

Für nachfolgende Analysen war es zunächst erforderlich, das Vorhandensein der Stauschicht flächendeckend vorherzusagen. Dazu wurde die Zielvariable als Indikatorvariable mit den zwei Ausprägungen "Sand" und "Tieflehm" codiert, einer Variogrammanalyse unterzogen und schließlich mittels Indikatorkriging vorhergesagt. Als zweite Informationsschicht für die Abgrenzung der Managementzonen wurden die ebenfalls mittels Kriging interpolierten Daten des scheinbaren elektrischen Widerstands in 0 bis 100 cm Tiefe herangezogen. Die Verarbeitung beider Datensätze erfolgte mit einer Clusteranalyse (k-means clustering). Als letzter Schritt wurde die mittlere nFK in den für die Wasserversorgung der Pflanzen relevanten Horizonten ermittelt und in die Berechnung der Berechnungsempfehlung übergeben.

(2) Auf dem Versuchsschlag Dahlhausen waren keine offensichtlichen Auffälligkeiten wie die Stauschicht in Schöllnitz vorhanden. Daher haben wir dort direkt die Feldkapazität und den permanenten Welkepunkt für die nachfolgende Ableitung der nFK in drei Bodentiefen (10 cm, 35 cm, 60 cm) ermittelt. In einem 100-m Beprobungsgitter mit Zusatzpunkten in 50 m Abstand haben wir dazu insgesamt 60 Miniprofile aufgegraben und auf horizontalen Plattformen jeweils drei ungestörte Stechzylinder pro Tiefe vertikal entnommen, welche im akkreditierten Umweltlabor des FIB analysiert wurden (DIN EN ISO 11274; in Schöllnitz gleiches Vorgehen zur Ermittlung der nFK).

Die statistische Auswertung umfasste:

- Interpolation von Feldkapazität (FK) und Welkepunkt (PWP) in den drei Tiefen mittels Kriging mit externer Drift unter Einbeziehung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit
- Ableitung zweidimensionaler Managementzonen (MZ) aus den dreidimensionalen FK- und PWP-Karten unter Einbeziehung der Vorhersageunsicherheit zur Bestimmung der Anzahl der MZ und Beibehaltung der tiefenabhängigen Änderung dieser Parameter

Auf beiden Versuchsschlägen wurden in zwei kontrastierenden Managementzonen Messstationen zur Erfassung klimatischer Parameter und der Bodenfeuchte in vier Horizonten installiert, deren Daten Eingang in das Bewässerungssteuerungsmodell fanden.

Für die Versuchsflächen wurden Fruchtfolgen definiert. Grundvoraussetzung war dabei die Auswahl von regional- und betriebstypischen Fruchtarten, die standörtlich geeignet und bewässerungswürdig waren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Fruchtfolgen auf den Praxis-Versuchsschlägen

Jahr	Schöllnitz (28 ha)	Dahlhausen (41 ha)
2017	Winterroggen + Silomais	Winterweizen
2018	Silomais	Silomais
2019	Winterroggen + Silomais	Winterweizen
2020	-	Kartoffel

Praktische Erprobung der Infrarot-Thermographie zur Kennzeichnung des Wasserversorgungszustandes der Pflanzen

Wasser wird in der Pflanze nicht aktiv transportiert. Es folgt vielmehr einem Potentialgefälle von der freien Atmosphäre durch die Leitbahnen der Pflanze bis in den Boden. Maßgeblich für den Antrieb der Transpiration ist dabei das Sättigungsdefizit der Luft (z.B. Geisler 1980). Das Wasser entweicht dann über die, bei der Aufnahme von Kohlendioxid geöffneten, Spaltöffnungen der Pflanze. Bei dieser Verdunstung kommt es zu einem Phasenübergang von flüssig zu gasförmig, unterhalb des Siedepunktes. Energie, die zum Aufbrechen der Wasserstoffbrückenbindungen notwendig ist, wird dazu in Form von Wärme der direkten Umgebung der Stomata entzogen. Folglich kühlt das Blatt ab. Pflanzen, die ausreichend mit Wasser versorgt sind und uneingeschränkt transpirieren können, weisen also Blatttemperaturen auf, die kühler sind als die umgebende Luft. Umgekehrt weisen gestresste Pflanzen, die nur eingeschränkt transpirieren, keinen deutlichen Temperaturunterschied zur Umgebungsluft auf (vgl. Abbildung 2). Die Pflanzentemperatur stellt also grundsätzlich eine

situative und pflanzenbasierte Komponente bei der Bestimmung des Wasserversorgungszustandes von Pflanzen dar.

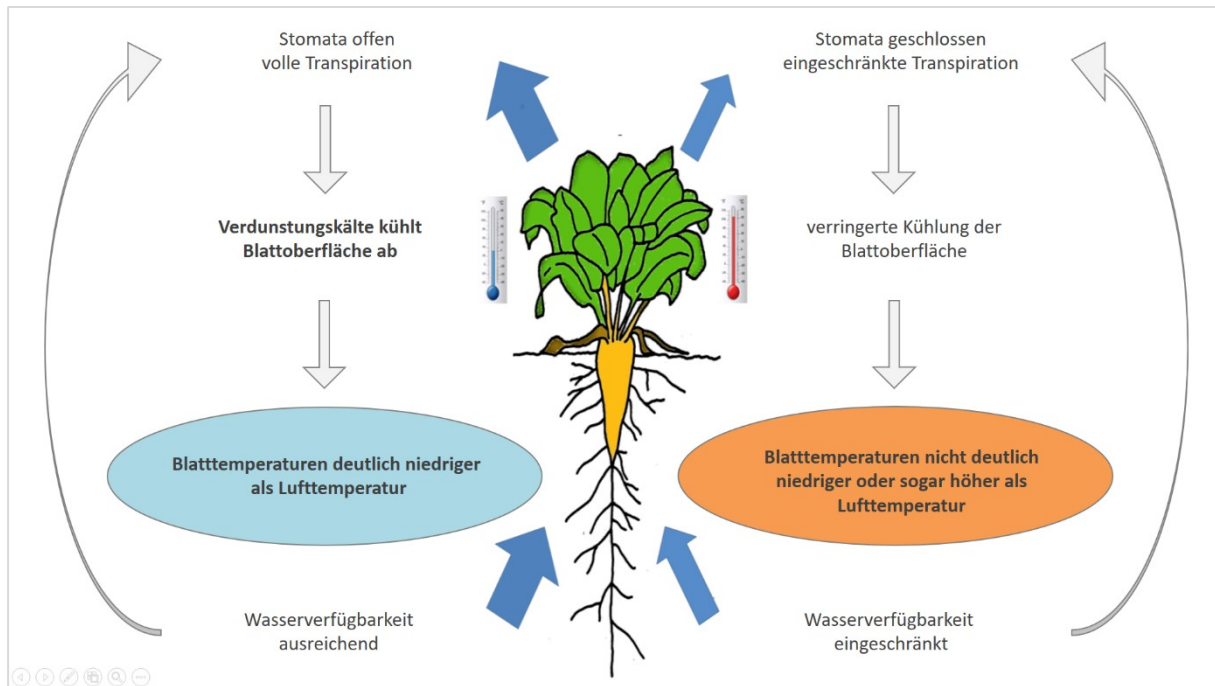


Abbildung 2: Darstellung des biophysikalischen Hintergrundes zur Messung der Blatttemperaturen

Der beschriebene Mechanismus funktioniert natürlich nur, wenn die Luft Wasserdampf überhaupt aufnehmen kann. Physikalisch beschrieben wird dies durch das Sättigungsdefizit der Luft. Dieses entspricht dem Dampfdruck einer Gasmenge, die die Luft bei einer bestimmten Temperatur bis zu ihrer Sättigung noch aufnehmen kann. An einem trockenen, warmen Tag vom Vormittag bis späten Nachmittag ist das Sättigungsdefizit relativ hoch. Frühmorgens dagegen ist die Luft mehr oder weniger gesättigt und kann nur wenig bis gar keinen Wasserdampf aufnehmen. Dasselbe gilt auch nach Regenfällen, am späteren Abend und nachts. Wenn man sich die dargestellten Prinzipien für die Bewässerungssteuerung zu Nutze machen möchte, ist man daher auf einen Zeitraum vom späten Vormittag bis zum Nachmittag beschränkt.

Pflanzentemperaturen lassen sich beispielsweise punktuell mit Pflanzenthermometern messen. Auch Infrarotsensoren oder -kameras können dazu verwendet werden (z.B. Nielsen & Gardner 1987, Schneekloth & Nielsen 2011). Das Messprinzip der Infrarotthermographie beruht auf der berührungslosen Erfassung und Interpretation der langwelligen infraroten Eigenstrahlung von Messobjekten im Bereich von etwa 7 - 15 μm . Die flächige und zeitgleiche Erfassung der Temperaturen in ausreichender Auflösung ist allerdings eine Herausforderung.

Es existieren mittlerweile einige IR-Kameramodelle, die für den Einsatz auf einem UAV (Unmanned Aerial Vehicle, Drohne) geeignet sind. Diese Kameras sind ungekühlt und besitzen einen Sensor mit einer relativ geringen Auflösung, dafür sind sie aber klein und leicht und vergleichsweise kostengünstig. Zudem existieren einige softwaretechnische Lösungen zur Nutzbarmachung dieser Art von Daten. Im Projekt wurde deshalb in 2017 ein UAS (Unmanned Aerial System) bestehend aus einem Oktokopter (*Oktopus*, CiS GmbH, Rostock), einem Infrarotkamera-System und einer einfachen Multispektralkamera angeschafft (vgl. Abbildung 3).

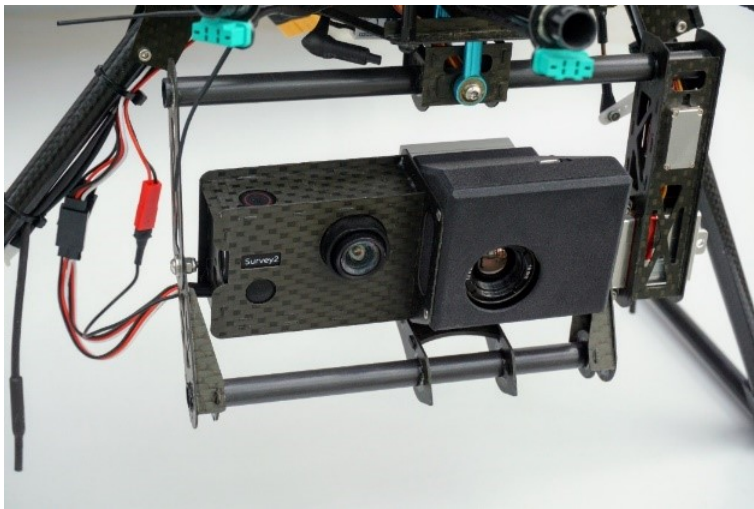


Abbildung 3: Kameramodul als Payload am UAV-Gimbal. Das Modul ist bestückt mit einer Infrarotkamera (Flir Tau2 mit TEAX external Shutter, rechts im Bild) und einer Multispektralkamera (Mapir Survey 2, links im Bild).

Dieses System hat folgende Spezifikationen:

- Infrarotkamera *Tau 2 640* mit 19 mm Objektiv von Flir Systems, Inc., USA mit *Thermal Capture 2.0* Modul sowie *TC Calibrator* von TEAX Technologies GmbH, Wilnsdorf, Auflösung von 512 x 640 Pixel; bei einer Flughöhe von 75 m beträgt die horizontale Auflösung pro Pixel (Ground Sample Distance) etwa 6,7 cm; der *TC Calibrator* wurde in 2018 nachträglich an das System adaptiert, als sich in 2017 herausstellte, dass die kamerainterne Kalibrierung als Voraussetzung für fehlerfreie Temperaturmessungen nicht einwandfrei funktionierte
- UAV mit zwei Lithium-Ionen-Akkus, maximales Gesamtgewicht von 2,5 kg inkl. Nutzlast von 700 g, maximale Flugzeit 30 Minuten
- Multispektralkamera (*Mapir Survey 2*, Mapir Inc., USA) mit Auflösung von 16 Megapixeln (4608 x 3456 Pixel), Weitwinkelobjektiv mit 82° horizontalem Bildwinkel; bei 75 m Flughöhe beträgt die Ground Sample Distance der Aufnahmen etwa 2,8 cm

Das Setup lässt sich im Feld zwar vollständig manuell steuern, effektiver und sicherer ist es jedoch, einen zuvor erzeugten Flugplan, basierend auf einem Polygon des Flächenumrisses, automatisch abfliegen zu lassen. Für die spätere Weiterverarbeitung der Aufnahmen ist eine Überlappung benachbarter Aufnahmen von mindesten 75 % empfehlenswert. Die Drohne kann mit einer Akkuladung auf diese Weise in 22 bis 25 Minuten bei 75 m Flughöhe eine Fläche von etwa 4 bis 5 ha abdecken.

Die Entwicklung eines effizienten Workflows zur Verarbeitung der Infrarotaufnahmen nahm im Projekt viel Zeit in Anspruch. Ab 2018 gelang eine flächige Ableitung der aktuellen Evapotranspiration (AET) aus den mit der Infrarotkamera ermittelten Oberflächentemperaturen des Pflanzenbestandes und die Integration in die Bewässerungssteuerung mit Irrigama steering. Folgende Arbeitsschritte waren für die Aufnahme und Auswertung der Temperaturbilder notwendig:

1. UAV-Kampagnen auf den Versuchsschlägen:
 - Auslegung und GPS-Einmessung von Aluminiumblechen als Markierungen (sichtbar in IR-Aufnahmen) zur späteren Verbesserung der Ausrichtungsqualität und für die Georeferenzierung
 - Flugdurchführung und Abbau
2. Vorverarbeitung der Einzelaufnahmen:
 - Umwandlung der Aufnahmen der IR-Kamera in allgemein lesbare TIFF-Rasterdateien, Löschen unbrauchbarer und überflüssiger Dateien am Anfang und Ende des Fluges, Integration der Aufnahmepositionen in die EXIF-Daten der Infrarotaufnahmen
3. Erzeugung von georeferenzierten Orthomosaiken der Pflanzentemperaturen und der Rot-/Nahinfrarotdaten aus den Einzelaufnahmen:
 - Einlesen der Bilddateien, Ausrichtung der Aufnahmen und Erzeugung einer dünnen Punktwolke, Erzeugung einer dichten Punktwolke, Dreiecksnetzvermaschung (Mesh) und Erzeugung des Orthomosaik mit der Photogrammetrie-Software *Metashape* (Agisoft LLC, Russland); ggf. Schärfung des internen Kontrasts der IR-Aufnahmen mit dem Wallis-Filter (Dakka et al. 2015)
4. Verschneidung der Orthomosaike von IR- und Multispektralkamera:
 - Nutzung der Bilddaten der Multispektralkamera zur Auftrennung der Temperaturwerte von Pflanzen und Boden über ein im Projekt empirisch entwickeltes Verfahren, welches auf der Reflexionsintensität der einzelnen Farben in der Multispektralaufnahme beruht; bei Einzelaufnahmen Nutzung einer Histogrammanalyse zur Trennung zwischen Boden- und Pflanzentemperatur

Der Zeitbedarf für den dargestellten Workflow ist nicht zu unterschätzen. Von der Flugplanung im Büro über die Flugkampagne im Feld bis zur fertigen Auswertung der Daten mit einem korrekt georeferenzierten IR-Orthomosaik als Endergebnis müssen etwa 6 bis 10 Arbeitsstunden (ohne Fahrtzeit) veranschlagt werden, wenn eine Fläche von 4 bis 5 ha abgeflogen werden soll. Die verarbeiteten Bilddateien bzw. Orthomosaik wurden im nächsten Arbeitsschritt in praktische Bewässerungsinformationen umgewandelt.

Ableitung der Bewässerungsempfehlungen für verschiedene Bewässerungsstrategien

Es wurden verschiedene Bewässerungssteuerungsstrategien untersucht, die auf unterschiedliche Art und Weise die Wassermenge und den Zeitpunkt der Applikation auf den Praxis-Versuchsflächen definierten (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Untersuchte Bewässerungssteuerungsstrategien auf den beiden Versuchsflächen

Jahr	Bezeichnung	Erläuterung	Fläche
2018	<i>ui</i>	gleichmäßige Bewässerung mit optimaler Gabe	Dahlhausen, Schöllnitz
	<i>vri</i>	teilflächenspezifische Bewässerung mit optimaler Gabe in allen Teilschlägen	Dahlhausen, Schöllnitz
2019	<i>ui</i>	gleichmäßige Bewässerung mit optimaler Gabe	Dahlhausen, Schöllnitz
	<i>vri</i>	teilflächenspezifische Bewässerung mit optimaler Gabe in allen Teilschlägen	Dahlhausen, Schöllnitz
	<i>def with vri</i>	wie vri, jedoch mit reduzierter Gabe in den Teilschlägen	Dahlhausen
2020	<i>ui</i>	gleichmäßige Bewässerung mit optimaler Gabe	Dahlhausen
	<i>vri</i>	teilflächenspezifische Bewässerung mit optimaler Gabe in allen Teilschlägen	Dahlhausen
	<i>def with vri</i>	wie vri, jedoch mit reduzierter Gabe in den Teilschlägen	Dahlhausen
	<i>vri-kc</i>	Steuerung nach pflanzentemperaturbasierter Korrektur der modellinternen Referenzverdunstung	Dahlhausen

Die Berechnung der Bewässerungsempfehlungen erfolgte mit Hilfe von Irrigama steering, welches im Projekt von der Vorgängerversion BEREST in eine moderne Webanwendung mit neuen Funktionalitäten überführt wurde. Ein zentrales Element zur Bestimmung des Bewässerungszeitpunktes sind dabei sogenannte 'Steuerkurven', die das Verhältnis zwischen aktueller Evapotranspiration der jeweiligen Kultur (AET) zur potentiellen Evapotranspiration (PET) für alle Zeitpunkte der Pflanzenentwicklung beschreiben (vgl. Abbildung 4).

Im Prinzip gilt, dass bei ausreichender Wasserverfügbarkeit die AET immer nur etwas geringer als die PET ist, maximal aber ebenso hoch. Der Quotient AET/PET sollte für eine optimale Pflanzenwasserversorgung und damit Ertragsbildung deshalb einen Wert von etwa 0,8 in der Hauptbewässerungssaison nicht unterschreiten. Diese Steuerkurven wurden für eine Vielzahl

von Fruchtarten u. a. am Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg in der DDR entwickelt und sind heute noch anwendbar.

In Irrigima steering wurde darüber hinaus eine Minimalkurve implementiert, die einen minimalen Verlauf des Quotienten einbringt (i.d.R. 0,6 in der Hauptbewässerungssaison), um eine Defizitbewässerung mit einer reduzierten Wassergabe zu ermöglichen, die einen noch wirtschaftlichen Ertrags ermöglicht. Des Weiteren spielen bei der Ermittlung der Gabenhöhe Bodenparameter wie die Feldkapazität, der Permanente Welkepunkt, die Porosität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Werte) in drei Bodenschichten bis 1,5 m Tiefe eine Rolle, welche wir aus den Bodenuntersuchungen ableiten konnten.

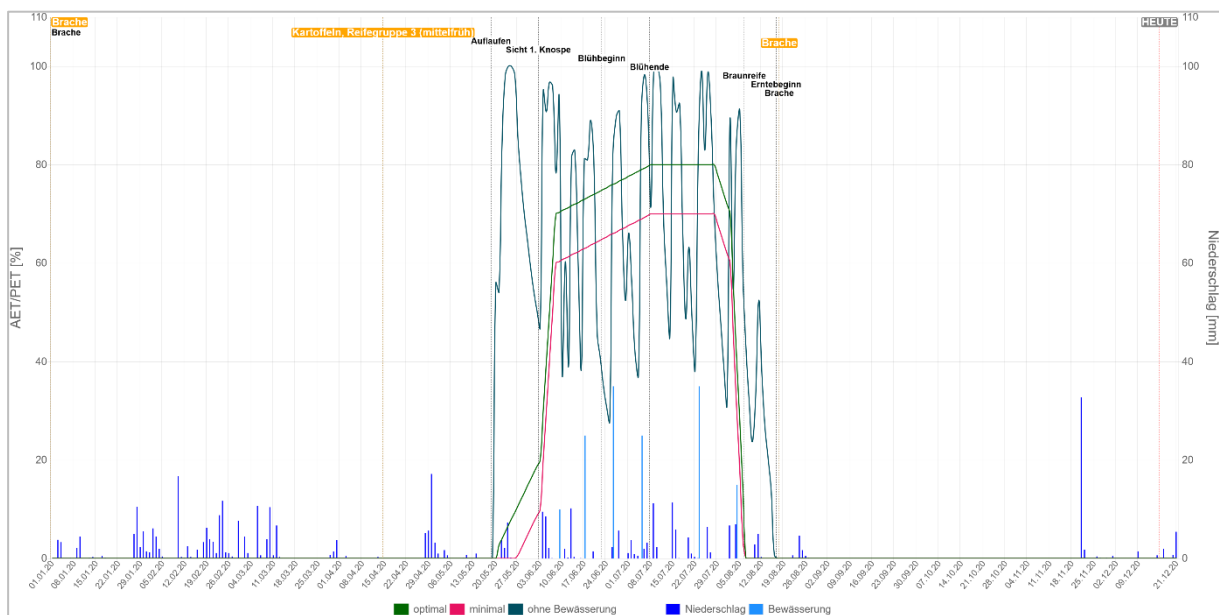


Abbildung 4: Screenshot mit einer Steuerkurve in Irrigima steering (Beispiel Kartoffeln in Dahlhausen im Jahr 2020). oliv = Verlauf der AET, grün = optimaler Verlauf des Quotienten AET/PET (Optimalkurve), magenta = Minimalkurve des Quotienten AET/PET

Um die Temperaturen des Pflanzenbestandes als situative Komponente in die Bewässerungssteuerung einzubeziehen, wurde dessen aktuelle Evapotranspiration aus den IR-Aufnahmen bzw. den thermalen Orthomosaiken der UAV-Missionen abgeleitet (siehe Kapitel 4.2). Dazu wurde ein Energiebilanzmodell angewendet, und zwar das Two-Source-Energy-Balance-Modell (TSEB) von Kustas & Norman (1997, 1999). Die Informationen zur Oberflächentemperatur von Boden und Pflanzen werden dabei als Inputparameter genutzt, um die Menge an latenter Energie im Bestand zu berechnen, die bei der Verdunstung verbraucht wird.

Die auf Basis der Temperaturdaten berechnete AET wurden zunächst direkt in Irrigima steering über eine Korrektur der Modellbodenfeuchten integriert. Allerdings können dadurch Fehler in der Parametrierung oder Struktur des Bodenfeuchte-Verdunstungsmodells nicht

behooben werden, weshalb der Effekt dieser Korrektur zeitlich begrenzt ist. Die aktuelle Bodenfeuchte stellt nur einen Parameter dar, der im Modell die Bewässerungsnotwendigkeit beeinflusst. Für einen nachhaltigeren Effekt müsste die Erfassung der AET deshalb täglich erfolgen. Das ist aufgrund des hohen Aufwandes allerdings praktisch nicht umzusetzen.

Erfolgsversprechender erscheint dagegen ein Weg, der mit Hilfe der Pflanzentemperaturen eine Korrektur des modellinternen k_c -Wertes ermöglicht. Der k_c -Wert übersetzt die Werte der FAO-Grasreferenzverdunstung (bereitgestellt vom DWD) in die potentielle Evapotranspiration der betrachteten Kultur. In Irrigama steering wie auch in anderen Bewässerungssteuerungsmodellen sind Standard- k_c -Werte für Fruchtarten und Entwicklungsstadien implementiert. Die tatsächlichen k_c -Werte können aufgrund von Wuchsunterschieden jedoch deutlich von diesen Standardwerten abweichen, was zu Fehlern bei der Berechnung der PET führt, welche sich empfindlich in die Berechnung des Zusatzwasserbedarfs fortpflanzen können.

Da der k_c -Wert für verschiedene Entwicklungsstadien des Pflanzenbestandes variiert, sind mehrere UAV-Befliegungen im Laufe der Bewässerungssaison zu Zeitpunkten ohne Wassermangelstress notwendig. Die daraus ermittelten aktuellen k_c -Werte müssen dann sehr zeitnah berechnet und in Irrigama steering eingegeben werden, wenn die Bewässerung damit operativ gesteuert werden soll. Diese Strategie wurde in 2020 auf dem Versuchsschlag Dahlhausen praktisch getestet.

Technische Nachrüstung der Beregnungsanlagen in den Agrarbetrieben und praktische Erprobung der teilflächenspezifischen Bewässerung

In Schöllnitz war bereits zu Projektbeginn eine Kreisberegnungsanlage der US-amerikanischen Herstellerfirma Valley Inc. installiert, die vom Landwirtschaftsbetrieb Agrar GmbH Altdöbern für eine gleichmäßige Bewässerung des Schlages eingesetzt wurde. Die Anlage verfügt über sechs Rohrbögen und einen Überhang mit Endkanone. Sie konnte im Winter 2016/2017 mit Projekt- und Betriebsmitteln durch die Hüdig GmbH nachgerüstet werden, sodass auf der Länge von zwei Rohrbögen eine teilflächenspezifische Wasserausbringung möglich wurde. Der Rest der Anlage arbeitet nach wie vor mit gleichmäßiger Bewässerung. Bei der Nachrüstung wurden Magnetventile vor die einzelnen Bewässerungsdüsen geschaltet, sodass diese anschließend einzeln ansteuerbar waren. Zudem musste die Steuereinheit der Anlage durch eine neue Version ersetzt und elektrische Leitungen verlegt werden.

Auf der Fläche in Dahlhausen wurde im Laufe des Jahre 2017 eine Kreisberegnungsanlage des US-amerikanischen Herstellers Lindsay Corporation durch den Landwirtschaftsbetrieb

Grünhagen Ackerbau GmbH angeschafft. Die Anlage verfügt über 7 Rohrbögen und einen Überhang mit Endkanone. Die Installation erfolgte durch den Projektpartner Hydro-Air GmbH. Die Anlage wurde im Herbst/Winter 2017/2018 mit Bauteilen für einen teilflächenspezifischen Betrieb auf den beiden äußeren Rohrbögen und dem Überhang umgerüstet. Dazu wurden Magnetventile, eine zusätzliche Steuereinheit und elektrische Leitungen angebracht.

Die Berechnung der Bewässerungszeitpunkte und -mengen für die verschiedenen Bewässerungsstrategien (vgl. Tabelle 2) erfolgte durch das FIB mit Irrigama steering. Diese Bewässerungsempfehlungen wurden durch die Agrarbetriebe umgesetzt.

Ertragserfassungen in Feldversuchen

Pflanzenerträge und Qualitätsparameter des Ernteguts wurden auf beiden Praxis-Versuchsflächen untersucht. In Dahlhausen erfolgten verschiedene Bonituren und Erntemaßnahmen auf Einzelparzellen, die in den verschiedenen Managementzonen lokalisiert waren. Zusätzlich wurden auf beiden Flächen die mit der Erntetechnik der Landwirtschaftsbetriebe auf den Gesamtschlägen erfassten Erträge einbezogen. Ziel war es, die Erträge und Qualitätsparameter unter den verschiedenen Bewässerungsstrategien zu ermitteln und die jeweiligen Unterschiede zueinander und zu unbewässerten Teilbereichen herauszuarbeiten. In Dahlhausen erfolgte zu diesem Zweck die Anlage einer Mindestanzahl von Parzellen (in der Regel 6 pro Variante), die zufällig in den Teilbereichen auf dem Schlag verteilt wurden. Die Parzellengröße schwankte je nach Fruchtart zwischen 2 und 3 m² (Tabelle 3). Die Handernte und nachfolgende Bearbeitung (dreschen oder häckseln) erfolgte durch das FIB. Ausgehend von den Ergebnissen wurden die Erträge und darauf basierend die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Bewässerungsstrategien berechnet und verglichen.

Tabelle 3: Durchgeführte händische Erntemaßnahmen auf der Praxis-Versuchsfläche in Dahlhausen

Jahr	Fruchtart	Flächengröße der Parzellen	Untersuchte Pflanzenparameter
2018	Silomais	2,25 m ² (3 x 0.75 m)	Ganzpflanzenertrag, Wuchshöhe
2019	Winterweizen	2 m ²	Kornertrag, Strohertrag, Proteingehalt
2020	Kartoffeln	3 m ²	Knollenertrag, Stärkegehalt

Kosten-Nutzen-Analysen

Ein Indikator für den ökonomischen Erfolg von Bewässerungsmaßnahmen, der auch zum Vergleich verschiedener Bewässerungsstrategien dienen kann, ist die bewässerungskostenfreie Leistung. Sie wird nach der Formel: *Bewässerungskostenfreie Leistung = Erlöse mit Bewässerung – Erlöse ohne Bewässerung – Bewässerungskosten*

berechnet. Zur Ermittlung des Minuenden und der beiden Subtrahenden werden jeweils unterschiedliche Eingangsgrößen benötigt, wie beispielsweise der Wasserpreis, die Kosten für die Anschaffung der Bewässerungsinfrastruktur, die Pflanzenerträge oder die Erzeugerpreise (vgl. Tabelle 1). Die Informationen wurden durch die Landwirtschaftsbetriebe zur Verfügung gestellt oder der Literatur entnommen. Um potentielle Auswirkungen eines höheren Wasserpreises einzuschätzen, wurde zusätzlich zum derzeit in Brandenburg geltenden Preis (0,01 EUR/m²) ein höherer Wasserpreis berücksichtigt, der auch in der politischen Diskussion angeführt wird (0,10 EUR/m²). In Brandenburg wurde zudem im Rahmen der Agrarinvestitionsförderung ein Investitionskostenzuschuss in Höhe von 20% des Anschaffungswertes für Investitionen in wassersparende Bewässerungstechnik gewährt (MLUL 2019). Für sämtliche Investitionen wurde eine Abschreibungsdauer laut AfA-Tabellen für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (BMF 2000) berücksichtigt. Es wurden darüber hinaus Zinssätze von 2,5 oder 4% je nach Art der Investition in die Berechnung der jährlichen Abschreibung pro ha einbezogen.

Tabelle 4: Parameter zur Berechnung der Erlöse und Bewässerungskosten

Parameter	Stufe 1 (niedrig)	Stufe 2 (hoch)
Erzeugerpreise, bezogen auf TM:		
Futtererbsen	185 EUR/Mg	210 EUR/Mg
Stärkekartoffeln	70 EUR/Mg	100 EUR/Mg
Winterweizen	140 EUR/Mg	200 EUR/Mg
Silomais	30 EUR/Mg	38 EUR/Mg
Investitionsbeihilfe	20%	-
Wasserpreis	0,01 EUR/m ²	0,10 EUR/m ³

Aus den Anschaffungskosten für die Technik, der Größe der Bewässerungsflächen sowie den Abschreibungszeiträumen und den Zinssätzen ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten Fixkosten pro ha und Jahr. Variable Bewässerungskosten basieren auf dem Preis für die Energie, die für die Wasserverteilung erforderlich ist, der Wassermenge und dem Wasserpreis.

Tabelle 5: Feste und variable Kosten für den Betrieb der Bewässerungsanlagen

Parameter	Dahlhausen, Dieselgenerator	Schöllnitz, Stromzuleitung
Fixkosten ohne Umrüstung auf teillächenspezifische Applikation	235 EUR/ha Jahr	263 EUR/ha Jahr
Fixkosten für Umrüstung auf teillächenspezifischen Betrieb	104 EUR/ha Jahr	

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit der Bewässerung sind die erzeugten Mehrerträge. Um über die im Projekt ermittelten Realerträge hinausgehende Aussagen treffen zu können, wurden der Zusatzwasserbedarf und die Erträge für eine viergliedrige Fruchtfolge

über 12 Jahre simuliert, und zwar für die Standort- und Witterungsbedingungen der beiden Versuchsschläge. Zur Simulation des Zusatzwasserbedarfs für die Strategien gleichmäßige, Defizit- und teilflächenspezifische Bewässerung wurde Irrigama steering verwendet. Das Pflanzenwachstumsmodell HERMES diente zur Herleitung der Pflanzenerträge (z.B. Kersebaum 2011). Dr. Dr. Kersebaum (ZALF) hat das Projekt dabei engagiert unterstützt.

Zusätzlich zu den bereits bekannten Steuerungsvarianten *ui* und *vri* (vgl. Tabelle 2) wurden bei der Simulation die Strategien *def* und *vri-def* betrachtet. Bei *def* findet eine gleichmäßige Bewässerung mit reduzierter Wassergabe statt, die ab einem Quotienten $AET/PET < 0.6$ in der Hauptbewässerungssaison erfolgt (bei *ui* und *vri* ab einem Quotienten < 0.8)

Bei der Konzeption der Variante *vri-def* wurde davon ausgegangen, dass in den Bereichen auf der Fläche mit der höchsten nutzbaren Wasserspeicherkapazität eine Bewässerung eigentlich später erfolgen sollte als auf dem Rest der Fläche. Den Pflanzen steht hier theoretisch, zum Zeitpunkt der Bewässerung auf den schlechteren Teilschlägen, noch ausreichend Wasser zur Verfügung. Rein praktisch ist es aber nicht sinnvoll, die besseren Teilschläge nicht mit zu bewässern, wenn die Anlage ohnehin bereits in Betrieb ist. In diesen Teilbereichen basiert die Berechnung der Bewässerungsmenge daher auf einem niedrigeren Quotienten von AET und PET in Irrigama steering (in der Regel 0,6 in der Hauptbewässerungssaison). Zum Vergleich wurde die unbewässerte Referenz (*non*) betrachtet.

5 Projektergebnisse

5.1 Ergebnisse

Bodenparameter in Dahlhausen und Schöllnitz

Auf der Testfläche in Schöllnitz besteht die Bodendecke aus den Bodentypen Braunerde (Profil 1) und Pseudogley (Profil 2). In Dahlhausen wurden die Profile als Gley-Braunerde (Profil 1) bzw. Braunerde (Profil 2) angesprochen.

In Tabelle 6 sind die nutzbaren Feldkapazitäten der Teilschläge (Bewässerungsmanagementzonen) aufgeführt, die in Dahlhausen und Schöllnitz in Irrigama steering zur Berechnung der Bewässerungsempfehlung herangezogen wurden (vgl. Kap. 0). Die Parameter für die Teilschläge 1 bis 4 in Dahlhausen wurden genutzt, um die Bewässerung innerhalb des teilflächenspezifisch bewässerten Bereiches unterhalb der beiden umgerüsteten Rohrbögen der Anlage zu steuern. Teilschlag 5 beschreibt die mittleren Bedingungen, die für die Berechnung der Bewässerungsempfehlung im gleichmäßig bewässerten Bereich verwendet wurden. Die Werte von Feldkapazität und Permanentem Welkepunkt stellen

Mittelwerte der Teilschläge 1 bis 4 dar. Der Unterschied des Medians der nutzbaren Feldkapazität in den drei betrachteten Bodentiefen von Teilschlag 1 bis Teilschlag 4 beträgt 16 mm. Auf der Versuchsfläche in Schöllnitz repräsentieren die Parameter von Teilschlag 3 die mittleren Bedingungen im gleichmäßig bewässerten Bereich, Teilschlag 1 und 2 kennzeichnen das teilflächenspezifisch bewässerte Areal, wobei in Schöllnitz, im Gegensatz zu Dahlhausen, Teilschlag 1 die bessere Standortqualität aufweist. Der Median der nutzbaren Feldkapazität in den drei Bodenschichten unterscheidet sich um 4 mm zwischen Teilschlag 1 und Teilschlag 2.

Tabelle 6: Nutzbare Feldkapazitäten der beiden Versuchsflächen

Fläche	Teilschlag	nutzbare Feldkapazität (mm)			
		n	Min	Med	Max
Dahlhausen	1	15	43	59	77
	2	13	55	72	86
	3	21	50	77	108
	4	11	62	75	84
	5	60	43	70	108
Schöllnitz	1	20	40	54	128
	2	10	42	50	128
	3	10	40	58	84

Praktische Erprobung der Infrarot-Thermographie zur Kennzeichnung des Wasserversorgungszustandes der Pflanzen

Von 2017 bis zum Ende der Vegetationsperiode 2020 wurden insgesamt 129 Flüge mit dem UAV zur Erfassung der Bestandestemperaturen mit der Infrarotkamera auf beiden Versuchsflächen durchgeführt. Eine Einzelaufnahme der Infrarotkamera ist beispielhaft in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen. Die Aufnahme stammt vom 02.07.2020 (ca. 12:30 Uhr) und stellt einen Ausschnitt des Kartoffelbestandes in Dahlhausen dar. Die Flughöhe betrug etwa 50 m, der Ausschnitt stellt also eine Fläche von etwa 23 x 29 m dar. Zu erkennen sind zwei Fahrgassen für Pflanzenschutzmaßnahmen sowie zwei Markierungen (markierte Aluminiumbleche), die zur spezifischen Kennzeichnung und Georeferenzierung dieser Aufnahmen dienten. Die Temperaturen reichen von ca. 23°C (Kartoffelpflanzen) bis 43°C (offener Boden in den Fahrgassen). Mit Hilfe der Histogrammanalyse konnten aus dieser Einzelaufnahme Temperaturen von Pflanzen und Boden getrennt ermittelt werden. Die Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein nicht beschnittenes Orthomosaik von Oberflächentemperaturen. Zu sehen ist der Maisbestand im östlichen Teil der Versuchsfläche Schöllnitz, am 09.07.2018. Der Flug wurde in 75 m Höhe durchgeführt und dauerte etwa von 14:45 bis 15:02 Uhr. Der letzte Bewässerungsdurchgang vor der Aufnahme

mit einer Gabe von 25 mm fand mehr als zwei Wochen zuvor statt. Der Bereich umfasst eine Fläche von etwa 4 ha. Insgesamt 229 Einzelaufnahmen wurden zur Erzeugung verwendet. Die Temperaturen reichen von etwa 36 bis 230 K. Man erkennt deutliche Temperaturunterschiede, die u. a. die Bodenheterogenität widerspiegeln. Einzelne Maispflanzen im Bestand können in der gewählten Vergrößerungsstufe nicht unterschieden werden.

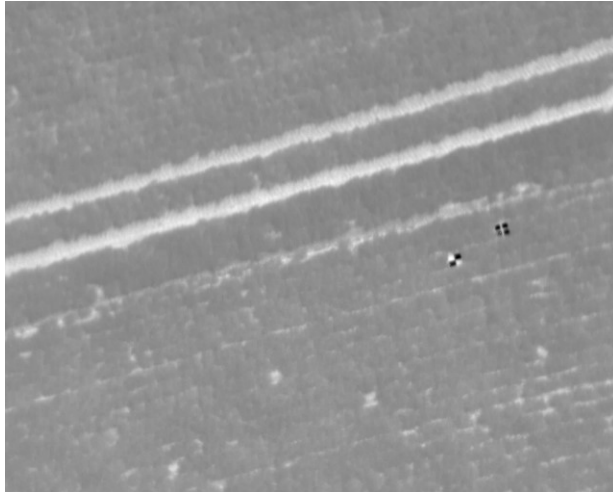


Abbildung 5: Einzelaufnahme der Infrarotkamera vom Kartoffelbestand in Dahlhausen, 02.07.2020

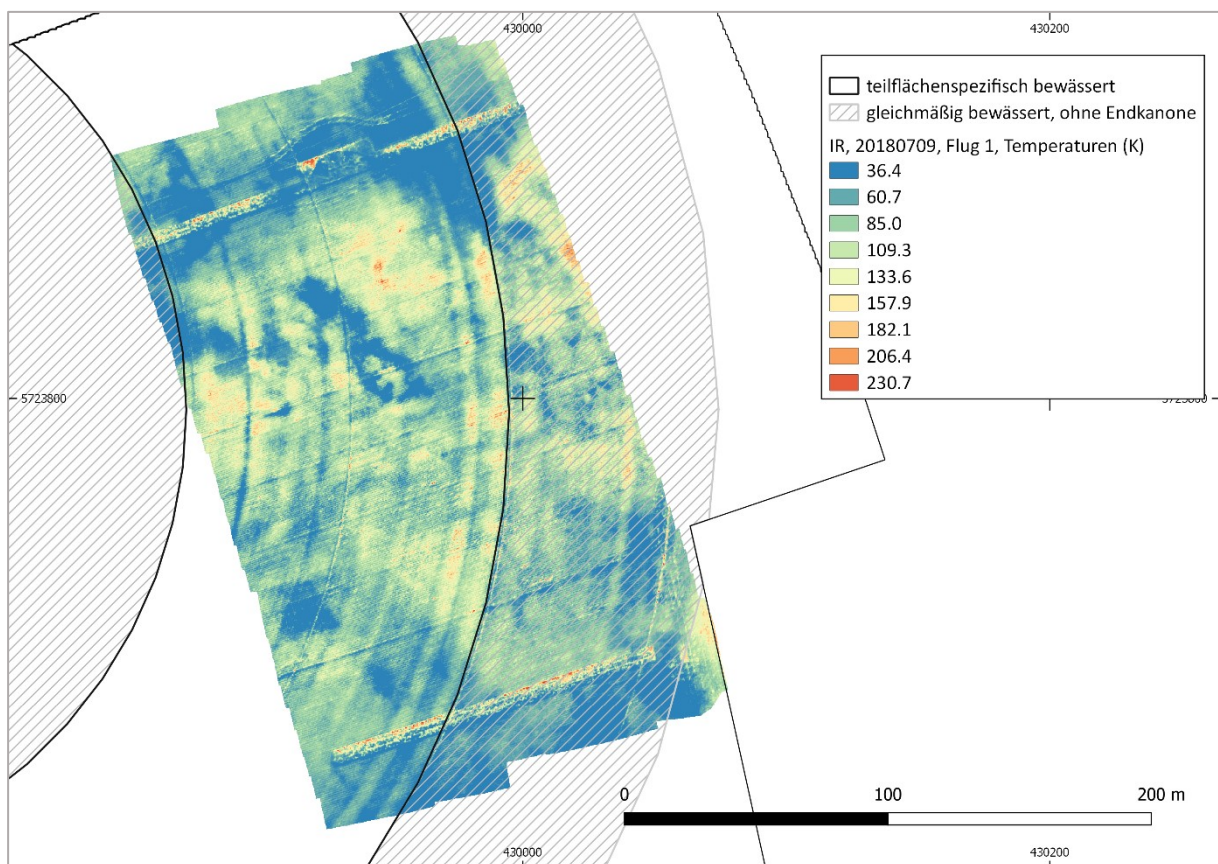


Abbildung 6: Orthomosaik der Oberflächentemperaturen des Maisbestandes in Schöllnitz am 09.07.2018

Die aktuelle Evapotranspiration der Pflanzenbestände wurde mit Hilfe des PyTSEB-Modells (Nieto et al. 2019) auf Basis der Orthomosaik oder Einzelaufnahmen der Bestandestemperaturen und der Multispektralaufnahmen der Mapir Survey 2 für insgesamt 30 Flugmissionen in 2018 und 2020 berechnet (25 Flüge in Dahlhausen, 5 Flüge in Schöllnitz).

In Abbildung 7 ist die AET für den in Abbildung 6 dargestellten Flächenausschnitt in Schöllnitz am 09.07.2018 beispielhaft dargestellt. Die Werte reichen von 1,85 mm/Tag bis zu 7,39 mm/Tag. Beim Vergleich der Bestandestemperaturen (Abbildung 6) mit der AET fällt vor allem ein Bereich im oberen Teil des Flächenausschnittes auf, der geringe Temperaturen und damit eine relativ hohe AET aufweist, während die umliegenden Bereiche durch relativ hohe Temperaturen und eine vergleichsweise geringe AET gekennzeichnet sind.

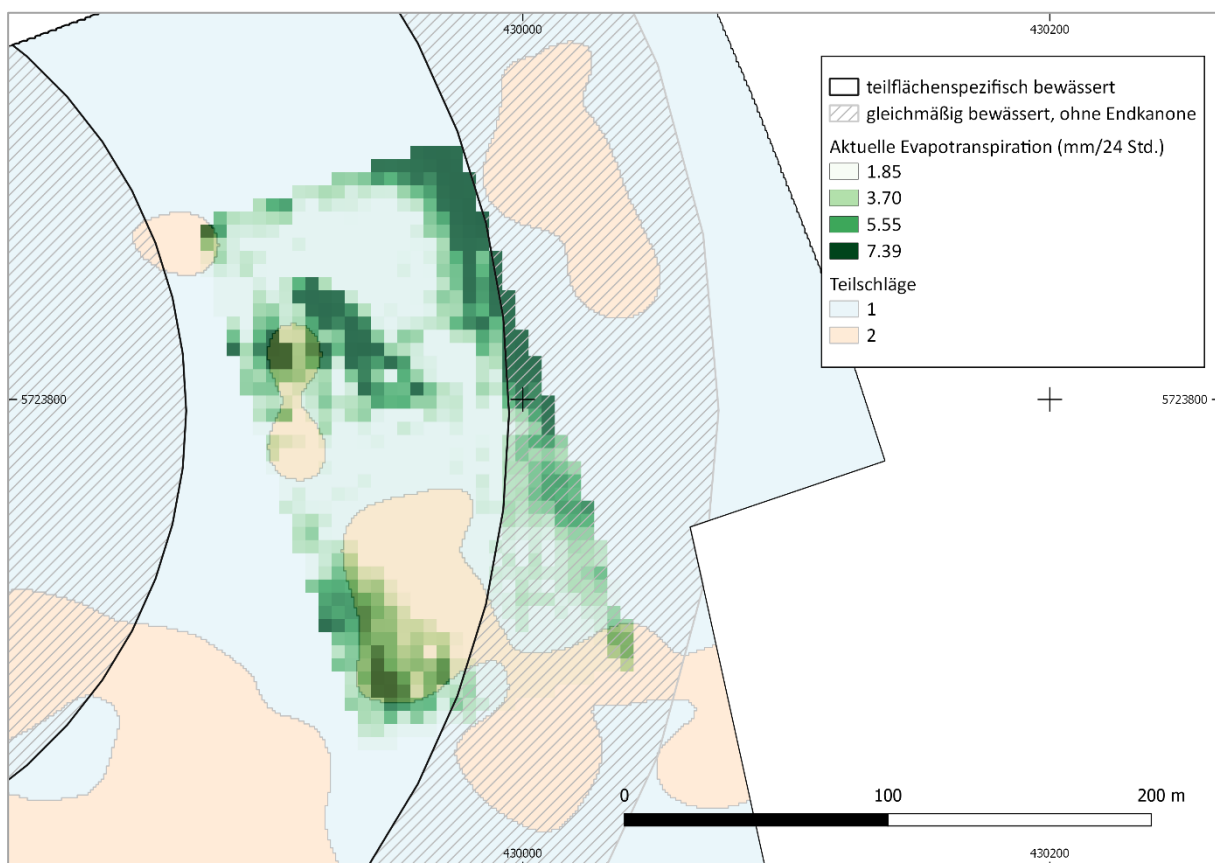


Abbildung 7: Aktuelle Evapotranspiration am 09.07.2018 und Abgrenzung der Teilschläge auf der Versuchsfläche Schöllnitz

Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der Ableitung von pflanzen temperaturbasierten kc-Werten auf Basis der UAV-Daten. Der Kartoffelbestand wurde dazu überflogen, als er optimal wasserversorgt war und die AET nahezu der PET entsprach. Diese aktuellen kc-Werte dienten anschließend zur Korrektur der modellinternen kc-Werte von Irrigama steering und führten zu

einer angepassten Empfehlung der Bewässerungsgabe in den entsprechenden Teilbereichen auf der Versuchsfläche Dahlhausen.

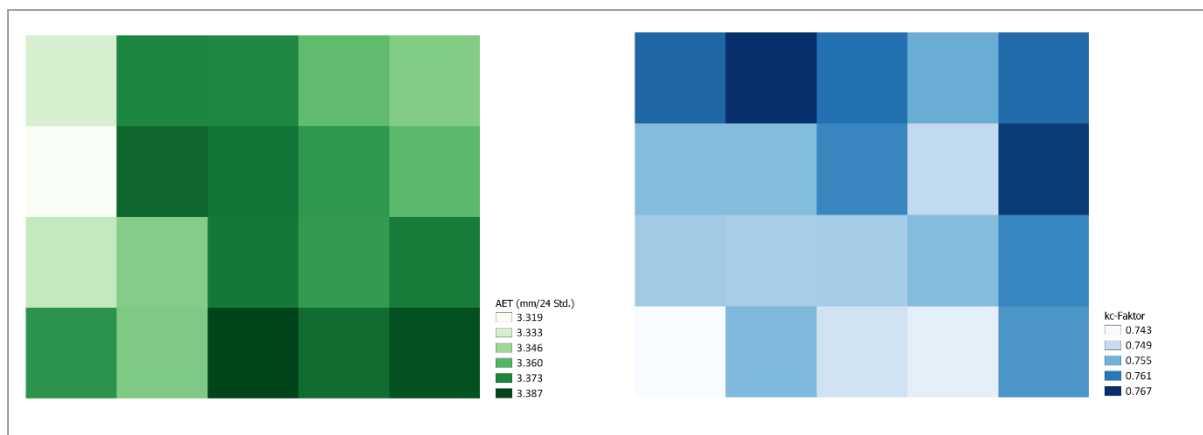


Abbildung 8: Aktuelle Evapotranspiration (links) und pflanzen temperaturbasierte kc-Faktoren (rechts) in einem Ausschnitt des Kartoffelbestandes, am 18.06.2020 auf der Versuchsfläche in Dahlhausen. Die Auslösung pro Rasterzelle beträgt 5 m.

Teilflächenspezifische Berechnung der Bewässerungsempfehlung und Umsetzung in die Anlagensteuerung

Die realen saisonalen Bewässerungsmengen für die verschiedenen Steuerungsstrategien sind beispielhaft für die Versuchsfläche Dahlhausen in Tabelle 7 dargestellt. Betrachtet man die einzelnen Teilschläge (TS) bei der Variante *vri* ist festzustellen, dass TS4 in Summe die geringsten Wassermengen erhalten hat und TS1 die höchsten.

In 2018 wurden zu Silomais insgesamt die höchsten Bewässerungsmengen ausgebracht. In dem Jahr betrug der mittlere Unterschied der Bewässerungsmengen zwischen den Steuerungsvarianten *ui* und *vri* 7 mm. Die Defizitbewässerung wurde in 2018 noch nicht untersucht. Beim Winterweizen in 2019 unterschieden sich die Gesamtgaben der gleichmäßigen Bewässerung mit optimaler Gabe (*ui*) und der teilflächenspezifischen Variante (*vri*) nicht. Die Mengen der Defizitbewässerung (*def with vri*) betrugen hier 81 bzw. 83% von *ui* (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Saisonale Bewässerungsmengen je Steuerungsstrategie in Dahlhausen

Jahr	Frucht	Saisonale Bewässerungsmenge (mm) je Steuerungsstrategie									
		ui	vri					def with vri		vri-kc	
			Mittel	TS1	TS2	TS3	TS4	TS1	TS3/4	TS1	TS3
2018	Silomais	287	280	285	279	279	277	-	-	-	-
2019	Weizen	151	151	151	151	150	151	121	125	-	-
2020	Kartoffeln	145	145	145	145	145	145	130	135	95	120

Bei der Bewässerung von Kartoffeln im Jahr 2020 existierten erneut keine Unterschiede zwischen *vri* und *ui*. Die teilflächenspezifische Defizit-Bewässerung (*def with vri*) benötigte je nach betrachtetem Teilschlag etwa 15 mm bzw. 90% sowie 10 mm bzw. 93 % der Menge von *ui*.

In 2020 wurde zusätzlich die Variante *vri-kc* untersucht, bei der die Wassermengen mit Hilfe von temperaturbasierten *kc*-Faktoren hergeleitet worden sind. Bei dieser Variante konnten im Vergleich zu *ui* 46% (TS1) bzw. 17% (TS3) Wasser eingespart werden.

Die teilflächenspezifische Bewässerung basierte auf Bewässerungsapplikationskarten, auf denen die mit Irrigama steering ermittelten Wassermengen je Teilschlag und Bewässerungssteuerungsvariante konkreten Flächenpolygonen zugewiesen wurden. Eine per GIS erzeugte Shape-Datei bildete die Grundlage für die konkrete Zuweisung von Wassermengen zu den einzelnen Polygonen in der Software *FieldMap* (Lindsay Corporation, USA). Aus *FieldMap* heraus konnte die fertige Applikationskarte anschließend per Datenfernübertragung an die Steuereinheit der Bewässerungsanlage übermittelt werden. Mit Hilfe der Mobilfunk-APP *FieldNET* (Lindsay Corporation, USA) konnte die Bewässerungsanlage per Smartphone gestartet und überwacht werden. Das Dieselaggregat, das in Dahlhausen bis zum Ende der Saison 2019 zur Energieversorgung der Anlage eingesetzt wurde, musste allerdings zuvor per Hand eingeschaltet werden. Für die Saison 2020 wurde ein neues Aggregat angeschafft, das ebenfalls per Fernsteuerung eingeschaltet werden konnte.

Die grafische Bedienoberfläche (GUI, Frontend) von Irrigama steering wird als Webanwendung vom Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. betrieben (vgl. Abbildung 9). Im Programm sind Importschnittstellen integriert, die eine automatische Integration von externen Daten in das System ermöglichen (z.B. Niederschlagsdaten des DWD). Die Bewässerungsempfehlung kann teilflächenspezifisch ermittelt werden. Die Bewässerungsempfehlung wird nach Eingabe von Grunddaten automatisch erzeugt, also ohne initialen „Knopfdruck“ eines Benutzers. Landwirte erhalten von der Software automatisch und in regelmäßigen, frei wählbaren Abständen eine E-Mail mit den benötigten Informationen zur optimalen Steuerung der Bewässerung ihrer Ackerflächen. Darüber hinaus steht der Berater in telefonischem Kontakt mit dem Bewässerungsbetrieb, um sich über die tatsächlich durchgeführten Bewässerungsereignisse, aktuelle Niederschlagsmengen auf einzelnen Bewässerungsschlägen oder den aktuellen Entwicklungsstand der bewässerten Kulturen abzustimmen und diese Informationen bei Bedarf in Irrigama steering rückzuführen.

Abbildung 9: Screenshot des Grunddaten-Fensters von Irrigama steering

Simulierte Pflanzenerträge

Die simulierten Trockenmasseerträge der verschiedenen Bewässerungssteuerungsvarianten und der unbewässerten Referenz auf beiden Versuchsflächen sind in Abbildung 10 dargestellt. Es sind flächengewichtete Mittelwerte, die aus den Einzelwerten der verschiedenen Teilschläge, unter Berücksichtigung des jeweiligen Flächenanteils, berechnet wurden.



Abbildung 10: Mit HERMES berechnete mittlere Erträge (TM). Gemittelt wurden jeweils 6 Einzelwerte je Bewässerungsvariante, die sich aus der Kombination von 2 Versuchsschlägen und 3 Wiederholungen pro Fruchtart ergeben.

Zwischen den Varianten ui , vri und $vri-def$ bestehen bei allen Fruchtarten nur geringe Ertragsunterschiede. Die Erträge der gleichmäßig voll-bewässerten Variante (ui) betragen in Relation zu unbewässert (non) bei Erbse etwa 380%, bei Kartoffel etwa 117%, bei Winterweizen etwa 83% und bei Silomais etwa 52%. Bis auf Winterweizen ist bei allen

Fruchtarten der Ertrag von *def* geringer als von *ui*, *vri* bzw. *vri-def* (1, 3 und 6% bei Winterweizen, Silomais und Kartoffeln, 40% bei Erbsen). Unterschiede zwischen *ui*, *vri* und *vri-def* sind nicht erwähnenswert.

Pflanzenenerträge in den Feldversuchen

Die realen Erträge der Feldversuche sind zum Vergleich in Tabelle 8 dargestellt. Die Angaben stellen Mittelwerte aus 6 bis 9 Einzelparzellen je Fruchtart, Teilschlag (TS) und Steuerungsvariante dar. Im Unterscheid zur Simulation ist bei Kartoffeln und Silomais der Mehrertrag der Varianten mit optimaler Wassergabe (*ui* und *vri*) gegenüber der unbewässerten Referenz (*non*) auf Teilschlag 1, mit geringerer nFK, deutlich höher, als auf den besseren Teilschlägen (TS 3+4). Unterschiede zwischen *ui* und *vri* sind bei allen drei Fruchtarten und in beiden untersuchten Teilschlägen nur gering oder nicht vorhanden.

Tabelle 8: Vergleich der mittleren Trockenmasseerträge (TM) der verschiedenen Fruchtarten in den Feldversuchen in Dahlhausen unter den verschiedenen Bewässerungssteuerungsstrategien sowie für die unbewässerte Referenz (*non*) für die Teilschläge 1 und 3/4

TS	Steuerung	Kartoffel (2020)		Winterweizen (2019)		Silomais (2018)	
		TM (Mg/ha)	Mehrertrag zu non (Mg)	TM (Mg/ha)	Mehrertrag zu non (Mg)	TM (Mg/ha)	Mehrertrag zu non (Mg)
1	<i>ui</i>	8,32	2,11	4,12	2,75	19,56	11,02
	<i>vri</i>	8,32	2,11	3,69	2,32	19,75	11,21
	<i>def with vri</i>	7,77	1,56	2,52	1,15	-	-
	<i>kc</i>	7,12	0,91	-	-	-	-
	<i>non</i>	6,21	-	1,37	-	8,54	-
3 + 4	<i>ui</i>	9,26	1,39	6,13	3,12	25,03	5,15
	<i>vri</i>	9,26	1,39	6,19	3,18	26,62	6,74
	<i>def with vri</i>	10,08	2,21	6,31	3,30	-	-
	<i>kc</i>	9,09	1,21	-	-	-	-
	<i>non</i>	7,87	-	3,01	-	19,88	-

Simulierte Bewässerungsmengen

Die simulierten Bewässerungssummen der verschiedenen Steuerungsvarianten pro Saison sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Werte der Varianten *vri* und *vri-def* stellen flächengewichtete Mittel der Einzelwerte der jeweiligen Teilschläge einer Fläche dar.

Die jeweils höchsten Wassergaben haben die Varianten *ui* oder *vri* erhalten. Die Variante mit reduzierter Menge (*def*) weist immer die geringsten Werte auf. Im Vergleich von *vri* und *ui* zeigt sich, dass die teilflächenspezifische Bewässerung im Einzelfall zwar durchaus bis zu 25,7% Wasser weniger verbraucht (z.B. Erbse, 2007, nicht dargestellt), im Mittel über beide Flächen

und alle Fruchtarten ist der Verbrauch jedoch etwa 2,6% höher als bei der gleichmäßigen Vollbewässerung (Dahlhausen: 3,7%, Schöllnitz: 1,7%). Die Variante *vri-def* weist gegenüber *ui* einen um etwa 2% geringeren Wasserverbrauch auf. Bei der gleichmäßigen Bewässerung mit reduzierter Gabe (*def*) können hingegen 34% Wasser gegenüber *ui* eingespart werden (Dahlhausen: 32,0%, Schöllnitz: 36,0%).

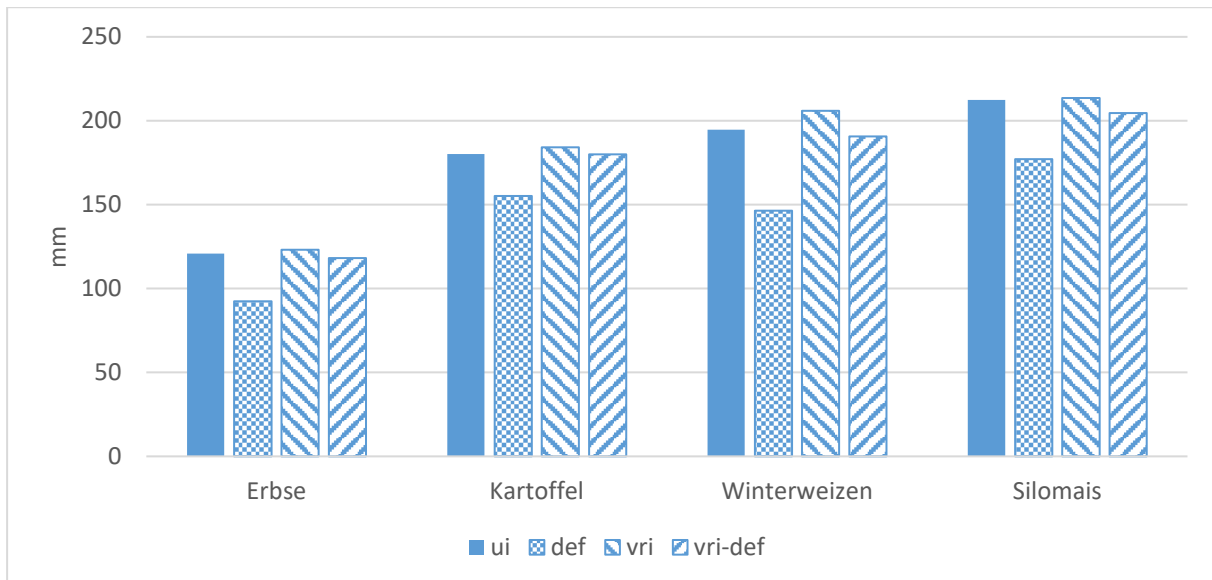


Abbildung 11: Vergleich der simulierten mittleren Bewässerungssummen auf beiden Praxis-Versuchsflächen. Gemittelt wurden jeweils 6 Einzelwerte je Bewässerungsvariante, die sich aus der Kombination von zwei Versuchsschlägen und 3 Wiederholungen pro Fruchtart ergeben.

Bewässerungsmengen in den Feldversuchen

In Tabelle 9 sind die Wassermengen aufgelistet, die auf der Praxis-Versuchsfläche Dahlhausen in den verschiedenen Bewässerungssteuerungsvarianten real ausgebracht wurden. Die Werte basieren auf einer flächengewichteten Mittelung der Einzelwerte der verschiedenen Teilschläge. Zusätzlich wurden die relativen Unterschiede verschiedener Varianten zur gleichmäßigen Bewässerung mit optimaler Gabe (*ui*) berechnet. Allerdings wurden nicht in jedem Jahr alle Steuerungsvarianten untersucht, wie in Kapitel 4.3 dargestellt.

Die Wassermengen reichen von 105 mm (Kartoffeln in 2019, *kc*) bis 287 mm (Silomais in 2018, *ui*). Die Varianten *ui* und *vri* weisen nur geringfügig unterschiedliche mittlere Mengen auf (194 bzw. 192 mm). Die Werte bei den Varianten *vri-def* und *kc* sind im Mittel 13% bzw. 28% geringer, als bei Variante *ui*, wobei für *kc* allerdings nur ein Einzelwert existiert. Ein Vergleich mit den Werten aus der Simulation für Silomais in 2018 ergibt, dass in der Praxis deutlich geringere Mengen ausgebracht wurden, als in der Simulation mit Irrigama steering berechnet wurden (z.B. *ui*: 364 mm Simulation, 287 mm Realität). Der Unterschied zwischen *ui* und *vri* ist jedoch in beiden Fällen vernachlässigbar.

Tabelle 9: Vergleich der mittleren realen Bewässerungsmengen der verschiedenen Fruchtarten und Bewässerungssteuerungsstrategien in Dahlhausen sowie Darstellung der Unterschiede

Fruchtart	Jahr	Wassermengen (mm)				Unterschiede (%)		
		<i>ui</i>	<i>vri</i>	<i>def with vri</i>	<i>kc</i>	<i>ui - vri</i>	<i>ui - def with vri</i>	<i>ui - kc</i>
Kartoffel	2020	145	145	133	105	0	8	28
Winterweizen	2019	151	151	123	-	0	19	-
Silomais	2018	287	281	-	-	2	-	-
Mittel		194	192	128	105	2	13	28

Erlöse, Bewässerungskosten und bewässerungskostenfreie Leistungen aus der Simulation

Basierend auf den simulierten Ertragsdaten weist die Erbse mit 111 EUR/ha (niedriger Preis) bzw. 125 EUR/ha (hoher Preis) die geringsten mittleren Erlöse beider Versuchsflächen ohne Bewässerung auf (vgl. Abbildung 12). Die Werte von Kartoffel liegen bei 1.609 bzw. 2.299 EUR/ha.

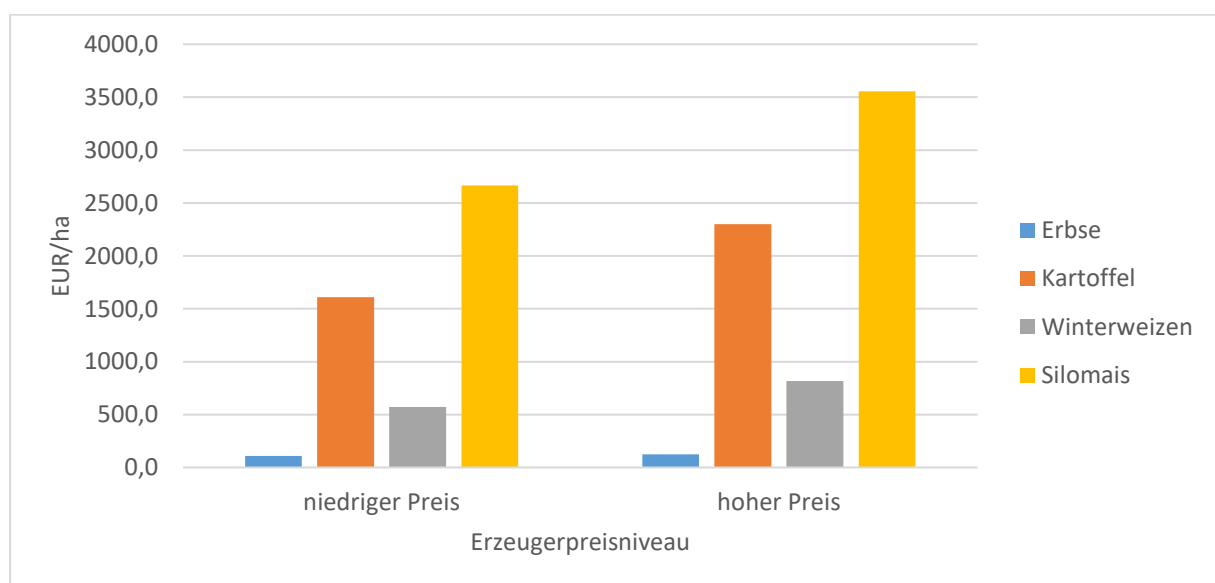


Abbildung 12: Vergleich der mittleren Erlöse der unbewässerten Varianten auf beiden Versuchsflächen in Abhängigkeit vom Erzeugerpreisniveau, basierend auf den Ertragsdaten der Simulation

Nicht bewässerter Winterweizen erreicht bei niedrigem Erzeugerpreis 572 EUR/ha oder 817 EUR/ha bei hohem Preis. Mit Silomais lassen sich im Mittel Erlöse von 2.666 EUR/ha bzw. 3.554 EUR/ha erzielen. Die Erlöse der unbewässerten Variante in den realen Feldversuchen in Dahlhausen schwanken zwischen 340 EU/ha (Winterweizen, niedriges Preisniveau) und 2.961 EUR/ha (Kartoffeln, hohes Preisniveau) (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Erlöse der unbewässerten Varianten der Feldversuche in Dahlhausen

Kartoffel (2020)		Winterweizen (2019)		Silomais (2018)	
EUR/ha (niedriger Preis)	EUR/ha (hoher Preis)	EUR/ha (niedriger Preis)	EUR/ha (hoher Preis)	EUR/ha (niedriger Preis)	EUR/ha (hoher Preis)
2.073	2.961	340	510	1.443	1.824

Die mittleren Gesamt-Bewässerungskosten der verschiedenen Steuerungsstrategien (vgl. Tabelle 11) ergeben sich aus den Wassermengen der Bewässerung sowie den festen und variablen Bewässerungskosten (hier nicht dargestellt). Sie variieren je nach Standort und Fruchtart zwischen 362 EUR/ha (Dahlhausen, Erbse, *def*) und 730 EUR/ha (Schöllnitz, Silomais, *vri*). Dargestellt sind die mittleren Gesamt-Bewässerungskosten pro ha, also die Summe aus Investitionskosten und variablen Kosten. Die Gesamt-Mittelwerte pro Variante reichen von 459 EUR/ha (*def*) bis 666 EUR/ha (*vri*).

Tabelle 11: Mittlere Gesamt-Bewässerungskosten der verschiedenen Bewässerungsstrategien in Abhängigkeit von Standort und Fruchtart (Stichprobenumfang = 3 Einzelwerte je Fruchtart, Standort und Bewässerungssteuerungsstrategie)

Standort	Fruchtart	Gesamt-Bewässerungskosten (EUR/ha)			
		<i>def</i>	<i>gl</i>	<i>vri</i>	<i>vri-def</i>
Dahlhausen	Erbse	362	414	558	552
	Kartoffel	500	526	691	682
	Winterweizen	444	512	698	683
	Silomais	496	547	697	690
Schöllnitz	Erbse	404	438	593	584
	Kartoffel	458	500	656	649
	Winterweizen	483	559	708	678
	Silomais	524	577	730	710
Mittel		459	509	666	654

Die bewässerungskostenfreien Leistungen der verschiedenen Steuerungsvarianten sind als Mittelwerte der fiktiven Fruchtfolge in Abbildung 13 dargestellt. Sie reichen von 375 EUR/ha (*vri-def*, niedriger Erzeugerpreis) bis 920 EUR/ha (*ui*, hoher Erzeugerpreis). Unabhängig vom Erzeugerpreis weisen die beiden gleichmäßig bewässerten Varianten höhere Werte auf als die teilflächenspezifische Bewässerung. Der Unterschied zwischen *ui* und *def* beträgt 68 (niedriger Erzeugerpreis) bzw. 105 EUR/ha (hoher Preis). Die Varianten *def* und *vri* unterscheiden sich um 87 (niedriger Preis) bzw. 49 EUR/ha (hoher Preis). Der Unterschied zwischen den beiden teilflächenspezifischen Varianten beträgt zwischen 6 (niedriger Erzeugerpreis) und 14 EUR/ha (hoher Preis), wobei *vri-def* die geringeren Werte aufweist.

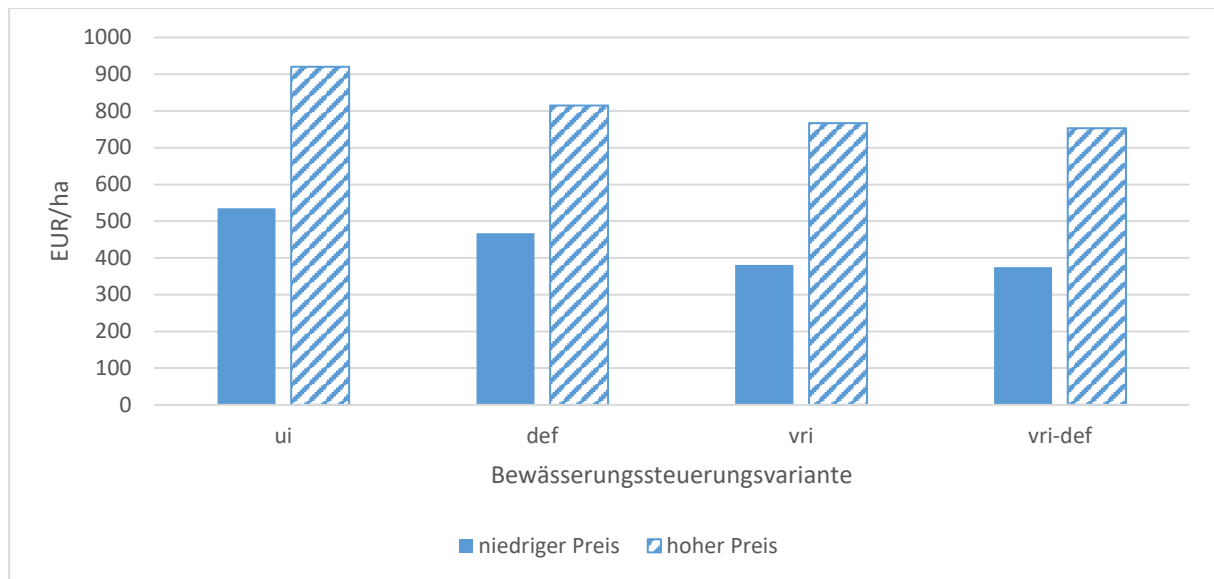


Abbildung 13: Mittlere bewässerungskostenfreie Leistungen der verschiedenen Bewässerungssteuerungsstrategien in der Fruchtfolge (Stichprobenumfang = 24 Einzelwerte je Bewässerungssteuerungsvariante und Erzeugerpreisniveau)

Abbildung 14 stellt die bewässerungskostenfreie Leistung von drei untersuchten Fruchtarten am Standort Dahlhausen in Abhängigkeit von der Standortqualität und der Bewässerungssteuerungsvariante dar. Zur Berechnung wurde dabei ein mittlerer Erzeugerpreis verwendet. Ziel der Darstellung ist zu klären, welchen Einfluss die Standortqualität auf die bewässerungskostenfreie Leistung hat. Die Standortqualität wird dabei über die, im Rahmen der Festlegung von Bewässerungsmanagementzonen ausgewiesenen, Teilschläge auf der Fläche definiert. Die Standortqualität reicht am Standort Dahlhausen von gering (Teilschlag 1) bis gut (Teilschlag 4) und wird bestimmt durch die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum (vgl. Kapitel 4.1). Bei der Kartoffel lassen sich auf jedem Teilschlag mit der gleichmäßigen Vollbewässerung (*ui*) die höchsten bewässerungskostenfreien Leistungen erzielen. Die Variante *def* schneidet bei dem Vergleich immer schlechter ab. Es sind nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Teilschlägen innerhalb einer Steuervariante zu erkennen. Das grundsätzlich gleiche Bild zeigt sich beim Silomais. Bei diesen beiden Fruchtarten spielt die Standortqualität offenbar keine Rolle. Eine Bewässerungssteuerung nach Variante *ui* führt zum wirtschaftlichsten Ergebnis. Auf Teilschlag 1 ist der Unterschied zwischen *ui* und *def* allerdings weniger deutlich als auf den übrigen Teilschlägen. Bei Winterweizen ist dagegen die gleichmäßige Bewässerung mit reduzierter Wassermenge (*def*) auf jedem Teilschlag die effektivere Variante und zwar umso mehr, je geringer die Standortqualität ist. So ist die bewässerungskostenfreie Leistung auf Teilschlag 4 mit 134 EUR/ha 128 EUR höher als auf Teilschlag 4. Im Teilschlag mit der höchsten nutzbaren Feldkapazität ist die Leistung bei Variante *ui* sogar negativ.

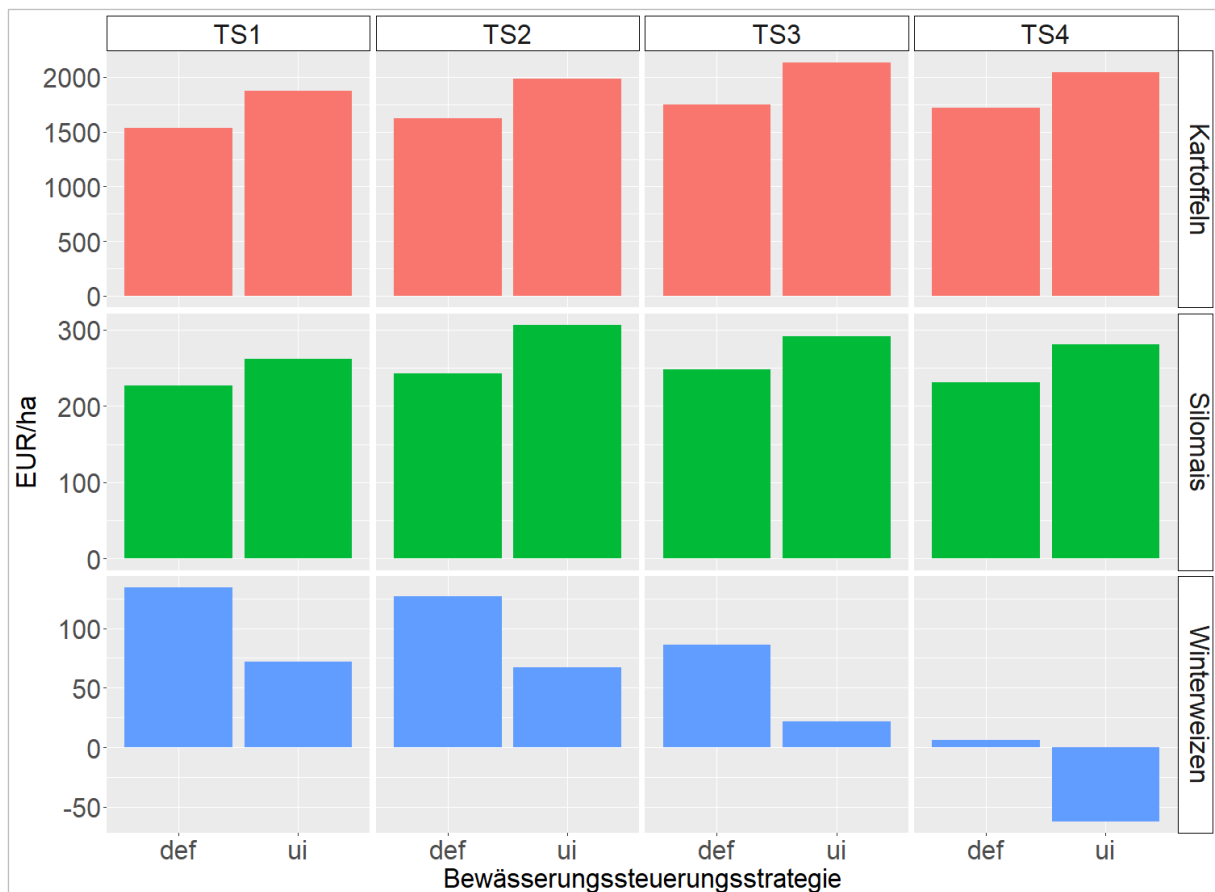


Abbildung 14: Vergleich der mittleren bewässerungskostenfreien Leistung von drei untersuchten Fruchtarten in Abhängigkeit von Standortortqualität und Bewässerungssteuerungsvariante (6 Einzelwerte je Fruchtart, Teilschlag und Bewässerungssteuerungsvariante)

Bewässerungskostenfreie Leistungen aus den Feldversuchen

Die bewässerungskostenfreien Leistungen aus den Feldversuchen in Dahlhausen reichen von -346,32 EU/ha (Winterweizen, *vri-def*, niedriges Preisniveau) bis 289,76 EUR/ha (Kartoffeln, *ui*, hohes Preisniveau). Insbesondere die Werte von Kartoffeln unterscheiden sich dabei deutlich von den Ergebnissen in der Simulation der 12jährigen Fruchtfolge (vgl. Tabelle 12), was auf Unterschiede in den Erträgen zwischen Simulationen und Feldversuchen zurückzuführen ist. Im Feldversuch waren beispielsweise die Mehrererträge durch Bewässerung deutlich geringer, als in der Simulation. Die Gründe dafür können vielfältig sein, wie beispielsweise eine nicht optimale Parametrisierung des HERMES-Modells - es ist letztendlich ein Modell, das sich der Wirklichkeit mehr oder weniger annähert - oder der Fehler, der bei der Umrechnung der Ergebnisse von kleinen Versuchsparzellen im Feldversuch auf Hektarebene ergibt.

Tabelle 12: Bewässerungskostenfreie Leistungen je nach Fruchtart, Bewässerungssteuerungsvariante und Preisniveau aus den Feldversuchen auf der Versuchsfläche Dahlhausen

Steuerung	Kartoffel (2020)		Winterweizen (2019)		Silomais (2018)	
	EUR/ha (niedriger Preis)	EUR/ha (hoher Preis)	EUR/ha (niedriger Preis)	EUR/ha (hoher Preis)	EUR/ha (niedriger Preis)	EUR/ha (hoher Preis)
<i>ui</i>	64,11	289,76	-51,91	157,39	-13,95	161,32
<i>vri</i>	-113,23	100,68	-213,70	-12,10	-67,95	133,75
<i>vri-def</i>	-33,52	206,48	-346,32	-218,22	-	-
<i>kc</i>	-181,30	-23,48	-	-	-	-

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Umsetzung der Bewässerungsempfehlung in die Anlagensteuerung

Der gesamte Ablauf einer Bewässerung, von der Ermittlung der Wassergabe mit Hilfe von Irrigama steering über die Übermittlung der Information an die Anlage im Feld sowie die Durchführung und Überwachung der Bewässerung bis zum Zurückfahren der Anlage an ihren Startpunkt, konnte bereits weitgehend automatisiert werden. Irrigama steering ist so konzipiert worden, dass Bewässerungsbetriebe regelmäßig automatisiert eine E-Mail mit den notwendigen Bewässerungsinformationen für die entsprechenden Flächen erhalten. Die Umsetzung dieser Information in die Anlagensteuerung selbst muss derzeit noch separat per Funk bzw. per Hand am Terminal der Anlage vorgenommen werden. Eine Weiterentwicklung dieses Systems wäre, in Irrigama steering eine Schnittstelle zu schaffen, durch welche die Bewässerungsinformationen direkt und automatisch in geeignete Fernsteuerungs-Apps integriert werden können. Die Smartphone-Applikation *Raindancer* des deutschen Unternehmens IT-Direkt Business Technologies GmbH (Berlin) stellt beispielsweise eine solche Lösung dar, die zugleich auch für eine automatisierte Dokumentation des Bewässerungsgeschehens genutzt werden kann.

Ableitung von Praxisempfehlungen inklusive einer Kosten-Nutzen-Analyse zur Bewässerungswürdigkeit

Ausgehend von den dargestellten Ergebnissen der Simulation kann eine teilflächenspezifische Bewässerung der untersuchten Fruchtarten unter den derzeitigen Rahmenbedingungen in Brandenburg aus ökonomischer Sicht nicht empfohlen werden. Es konnte zudem aufgezeigt werden, dass mit der im Projekt simulierten Art der teilflächenspezifischen Bewässerungssteuerung keine Einsparung von Wasser einhergeht.

Je nach Fruchtart unterscheiden sich die Empfehlungen zur gleichmäßigen Bewässerung mit optimaler oder reduzierter Wassergabe. Winterweizen sollte mit einer reduzierten Gabe

bewässert werden. Die Bewässerung von Silomais und Kartoffeln ist am effektivsten mit voller, nicht reduzierter Wassermenge - Wassereinsparungen führen zu starken Ertragsrückgängen.

Die weitere Auswertung der Daten zeigte, dass sich eine Bewässerung bei allen betrachteten Fruchtarten grundsätzlich eher bei einem hohen Erzeugerpreisniveau lohnt. Bei Erbsen ist dies nur bei einer gleichmäßigen Vollbewässerung der Fall. Bei einem niedrigen Erzeugerpreisniveau lohnt sich eine Bewässerung von Erbsen nicht. Diese Aussage beruht allerdings auf den Erträgen, die mit HERMES simuliert wurden. Dabei wurde das Modell nicht mit Realdaten von den Versuchsflächen parametrisiert, weil Erbsen nicht im Projektzeitraum auf den Flächen angebaut wurden. Im Literaturvergleich stellt sich heraus, dass das Ertragsniveau von Erbsen auf vergleichbaren Standorten in der Realität höher ausfällt als in der vorliegenden Simulation. Hier besteht also weiterer Forschungsbedarf.

Eine situative Steuerung der Bewässerung, die auf den Bestandstemperaturen basiert, wurde in der Kosten-Nutzen-Analyse nicht betrachtet, weil bisher keine praxisreifen Lösungen für diese Variante existieren. Ein prinzipiell erfolgversprechender Ansatz, der zu nennenswerten Einsparungen von Wasser führen könnte, ist die Ableitung von pflanzentemperaturbasierten k_c -Werten und ihre Berücksichtigung bei der Bewässerungssteuerung mit Irrigama steering. Dennoch stehen der Einsparung von variablen Kosten bei der Wasserausbringung noch unbekannte Mehrkosten für die Erfassung der Bestandstemperaturen und Ableitung der k_c -Werte gegenüber.

Charakterisierung des Wasserbedarfs der Pflanzen mit Hilfe von IR-Thermografie

Die Ermittlung der Oberflächentemperaturen von Ackerkulturen per IR-Thermografie mit einem UAV stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Insbesondere der Zeitbedarf für den gesamten Arbeitsablauf, von der Planung der Flüge bis zum Übermitteln einer Bewässerungsempfehlung an die Bewässerungsanlage, limitiert die Praxistauglichkeit dieser Technologie.

Ein weiteres Problem sind Wolken, die im Frühsommer und Sommer, also in der Haupt-Thermografie-Saison, häufig in lockerer und unregelmäßiger Formation auftreten (insbesondere Cumulus und Altocumulus) und zu einer zeitlich und räumlich heterogenen Beschattung auf der Fläche führen. Der Wolkenschatten verändert temporär die Einstrahlungsverhältnisse auf der Fläche und führt zu uneinheitlichen Aufnahmeergebnissen. Im schlechtesten Fall kann der gesamte Aufnahmefundus eines betroffenen Fluges dann nicht verwendet werden. Eine mögliche Strategie dem Problem zu begegnen ist, an so einem Tag gar nicht erst zu einer Flugmission aufzubrechen. Allerdings entgehen dabei möglicherweise Chancen, denn ob und wie intensiv die Bewölkung über der Zielfläche tatsächlich auftritt, lässt

sich aus der Ferne nicht sicher beurteilen. Gegebenenfalls muss vor Ort auf ein geeignetes Zeitfenster für den Einsatz der Drohne gewartet werden.

Wind im Pflanzenbestand beeinflusst das Messergebnis und erschwert enorm die korrekte Ausrichtung der Aufnahmen bei der Erzeugung der „Dünnen Punktwolke“ in der SfM-Software, weil sich das Muster potentieller Verknüpfungspunkte in den zeitlich aufeinanderfolgenden Aufnahmen durch die Bewegung der Pflanzen von Bild zu Bild ändert. Eine Strategie ist daher, möglichst an windstillen Tagen ohne Bewölkung zu fliegen oder möglichst größere Wolkenlücken zu nutzen oder bei homogen bedecktem Himmel zu fliegen. Im letzteren Falle ist allerdings dann auch die Transpiration der Pflanzen eingeschränkt. Welchen Effekt das auf die Aufnahmen hat, sollte in Folgeprojekten intensiver untersucht werden.

Im späteren Verlauf des Projektes wurden keine größeren zusammenhängenden Flächenpolygone mehr abgeflogen, sondern gezielt nur kleine Teilbereiche im Umfeld der bodenkundlich-meteorologischen Messstationen. Dadurch konnten einige der dargestellten Probleme umgangen oder zumindest deutlich gemindert werden. Allerdings ist dabei die Übertragung der auf kleiner Fläche gesammelten Daten auf die Gesamtfläche eine Herausforderung.

Flughöhen von 75 bis 100 m haben sich als sinnvoll herausgestellt, da dabei eine relativ große Fläche pro Bild erfasst werden konnte (z.B. bei 75 m ca. 43 x 35 m). Geringere Flughöhen verbessern dagegen die Pixel-Auflösung der Infrarotdaten und können dadurch die Eindeutigkeit der Zuordnung von Pflanzen- und Bodenpixeln zur Verwendung im *PyTSEB* verbessern. Hier muss ein Kompromiss gefunden werden.

Neben Infrarotkameras existieren, wie beschrieben, Infrarotsensoren, mit denen Temperaturen an einzelnen Messpunkten kontinuierlich gemessen werden können. Der Sensor einer Infrarotkamera stellt im Grunde genommen eine Ansammlung von vielen kleinen Infrarotsensoren, sog. Mikrobolometer, in einem Array dar. Sensoren haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu einer Kamera wesentlich günstiger in der Anschaffung sind. Eine Trennung von Pflanzen- und Bodentemperaturen ist mit den Daten von einem Sensor allein aber nicht möglich. Dazu werden mindestens zwei Sensoren benötigt, von denen einer auf den Boden gerichtet ist, um die Bodentemperatur zu erfassen, während ein zweiter die Pflanzentemperatur misst. Diese Erfassung ist allerdings nur punktuell und nicht flächig realisierbar.

Die Idee, den Wasserversorgungszustand mit Hilfe von IR-Sensoren zu erfassen, ist nicht neu (z.B. Nielsen & Gardner, 1987). Im niedersächsischen EIP-Projekt *SeBeK* hat man beispielsweise die Blatttemperaturen von Kartoffeln mit Hilfe von stationären IR-Sensoren erfasst und zur Bewässerungssteuerung auf Basis von Wasserstressindizes (CWSI) genutzt

(Zimmermann et al. 2019). In den Vereinigten Staaten wurden im Versuchsbetrieb komplette Kreisberegnungsanlagen mit IR-Sensoren direkt auf den Rohrbögen ausgestattet, die im laufenden Betrieb die Bestandstemperaturen erfassen (O'Shaughnessy et al. 2016). Die Daten der Sensoren wurden dazu genutzt, eine Karte des CWSI zu erstellen, die neben weiteren Eingangsdaten (z.B. punktuelle Bodenfeuchte) als Grundlage für folgende Bewässerungsdurchgänge dienen soll - zumindest für den Teilbereich der Fläche, den die Anlage zur Tageszeit überfährt.

Die Sensorbasierten Ansätze sind aufgrund von Limitationen in der räumlichen Auflösung (stationäre Sensoren) bzw. durch einen hohen Bedarf an Zusatzdaten (Sensoren auf den Rohrbögen) für Brandenburger Verhältnisse jedoch nicht praktikabel.

Eine weitere Alternative stellen Thermisch-Infrarotdaten dar, welche mit Satelliten wie Sentinel 3 oder Landsat 8 erhoben werden. Für das Jahr 2018 haben wir im Rahmen einer internationalen Kooperation aus Sentinel-3-Daten abgeleitete Karten der Evapotranspiration erhalten, welche wir in Irrigama steering assimiliert haben (S. 12). Ebenso wie bei Einbeziehung der UAV-Daten führte dieser Ansatz jedoch nicht zu einer Verbesserung der Modellvorhersage, zum einen aufgrund der eingeschränkten zeitlichen Auflösung, zum anderen aufgrund von Qualitätsbeschränkungen der abgeleiteten AET-Karten. Daraufhin haben wir auf Basis von Sentinel-NDVI-Karten (NDVI = Normalized Difference Vegetation Index) und publizierten Beziehungen zwischen NDVI und k_c -Faktoren die Irrigama-internen k_c -Faktoren an die tatsächlichen Verhältnisse im Pflanzenbestand angepasst. Beispielhafte Simulationen des Zusatzwasserbedarfs mit den angepassten k_c -Faktoren für den Schlag Dahlhausen haben ein gewisses Wassersparpotenzial aufgezeigt, da Teilbereiche mit einem schlechteren Pflanzenwachstum eher die Erntereife erreichen und damit Bewässerungsgaben in Richtung Saisonende entfallen könnten. Ein praktischer Test dieses Ansatzes war nicht möglich, da dafür zunächst einmal lokal angepasste Beziehungen zwischen Satellitenbasiertem NDVI und k_c -Faktoren aufgestellt werden müssten. Dazu eignen sich z. B. Lysimeteruntersuchungen. Hier besteht also noch zukünftiger Forschungsbedarf.

5.3 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

- Eine teilflächenspezifische Bewässerung ist aktuell keine wirtschaftliche Option in der Feldbewässerung unter den vorherrschenden Standortbedingungen Brandenburgs.
- Bei Kartoffeln und Silomais ist die gleichmäßige Bewässerung mit optimaler Gabenhöhe am wirtschaftlichsten.
- Die Beregnung von Winterweizen ist mit reduzierter Gabenhöhe wirtschaftlicher als mit optimaler Gabenhöhe.

- Die Steuerung von Kreisbewässerungsanlagen lässt sich mit Hilfe digitaler Hilfsmittel mittlerweile weitgehend automatisieren.
- Die Einbeziehung einer pflanzenbasierten Komponente der Bewässerungssteuerung auf Basis der Bestandstemperaturen ist technisch möglich und führt wahrscheinlich zur Einsparung von Wasser. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf.

5.4 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen

Zum förderpolitischem Ziel *Verbesserung landwirtschaftlicher Produktivität und Nachhaltigkeit* hat das EIP-Projekt *Precision Irrigation* beigetragen, indem:

- mit Irrigama steering ein modernes Instrument für die operative Steuerung der Bewässerung entwickelt wurde, dessen Nutzung einen effizienten Zusatzwassereinsatz auf wissenschaftlicher Basis garantiert. Eine Überbewässerung wird grundsätzlich vermieden, was die Nachhaltigkeit der Bewässerung steigert.
- verschiedene Bewässerungsstrategien getestet und bewertet wurden, darunter auch die Defizitbewässerung als eine Möglichkeit der Nutzung beschränkter Wasserressourcen.

Zum förderpolitischem Ziel *Verbesserung des Austauschs zwischen Forschung und Praxis* hat das EIP-Projekt *Precision Irrigation* beigetragen, indem:

- ein Netzwerk zwischen Wissenschaftlern, praktischen Landwirten, KMU und Verbänden geschaffen wurde. Ein Ergebnis der Zusammenarbeit ist bspw. das Positionspapier "Bewässerung in Brandenburg", welches beim Abschlussworkshop des Projektes am 23.11.2020 entstanden ist.
- eine Verstetigung der Zusammenarbeit von Partnern des EIP-Projektes in neuen Initiativen angestrebt wird.

5.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Die Projektergebnisse, insb. hinsichtlich des Wassersparpotentials sowie der Wirtschaftlichkeit der untersuchten Bewässerungsstrategien *gleichmäßige*, *teilflächenspezifische* und *Defizit-Bewässerung*, stehen Praktikern in der Handlungsanweisung "Ressourcenschonende Bewässerung in Brandenburg" zur Verfügung (<https://fbm-ev.de/de/ressourcenschonende-bewaesserung-in-brandenburg/>). Der OG-Partner Fachverband Bewässerungslandbau Mitteldeutschland verbreitet diese Handlungsanweisung im Rahmen von Mitgliederversammlungen und weiteren Anlässen auch über das Projektende hinaus.

Die im Innovationsprojekt entwickelte Software Irrigama steering besitzt einen hohen Technologie-Reifegrad und ist in der aktuellen Version für den praktischen Bewässerungslandbau nutzbar. Sie ermöglicht die automatisierte Steuerung der gleichmäßigen, teilflächenspezifischen und Defizit-Bewässerung unter Praxisbedingungen. Derzeit wird die Software in Kombination mit Beratungsdienstleistungen vom Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. für praktische Landwirte angeboten. Irrigama steering weist, v. a. im Vergleich zur Vorgängervariante BEREST und analog zu den Projektzielen, bereits einen hohen Automatisierungsgrad auf. Das FIB strebt eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Werkzeugen zur Entscheidungsunterstützung für den Bewässerungslandbau Brandenburgs an, darunter auch die Implementierung neuer wissenschaftlicher Ergebnisse in Irrigama steering.

5.6 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Das Projektziel war die Entwicklung einer anwenderfreundlichen, wirtschaftlichen und automatisierten Lösung der teilflächenspezifischen und jederzeit bedarfsgerechten Präzisions-Bewässerung. Diese sollte im Kulturbestand erhobene Realdaten in den Steueralgorithmus rückführen (pflanzenbasierte Komponente). Daneben sollte eine technische Lösung zur direkten Ansteuerung der Spritzdüsen entwickelt werden. Alle Regelmodule des Systems sollten in einer Lösung zusammenarbeiten sowie praktisch erprobt, validiert und optimiert werden.

Diese Zielstellung wurde erreicht, indem

- Irrigama steering in eine neue Programmierungsumgebung mit Schnittstellen z. B. zur automatischen Wetterdatenabfrage überführt wurde,
- die technische Umrüstung der zwei Kreisberechnungsmaschinen für eine Einzeldüsenansteuerung auf den beiden Praxisschlägen erfolgt ist,
- das Zusammenspiel zwischen Bewässerungsempfehlung (Irrigama steering-Ausgabe) und Bewässerungsapplikation soweit optimiert wurde, dass sie "per Knopfdruck" erfolgen kann und
- verschiedene Bewässerungsstrategien praktisch erprobt wurden, wodurch alle Komponenten des Steuersystems fortlaufend verbessert werden konnten.

Lediglich bei der Rückführung sensorischer Realdaten konnte im Projekt noch keine praxisreife Lösung entwickelt werden. Die ursprünglich anvisierte Installation von Infrarotsensoren auf den Rohrbögen der Beregnungsanlage zur Ermittlung des aktuellen Wasserversorgungszustandes der Kulturen wurde verworfen, da eine umfassende

Literaturrecherche und -auswertung zu geringe Erfolgchancen dieser Strategie unter Brandenburger Bedingungen aufgedeckt hatte (Kap. 5.2). Stattdessen wurde ein UAV-basierter Ansatz getestet, welcher vielversprechende Ergebnisse geliefert hat. Wie das Projekt gezeigt hat, scheidet der Einsatz von UAV unter Praxisbedingungen aus wirtschaftlichen Gründen allerdings aus. Perspektivisch werden Satellitendaten Ersatz bieten, hier besteht allerdings noch ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

5.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende

Fragestellungen

Eine wirtschaftliche Anschlussfähigkeit bietet v. a. die Weiterentwicklung von Irrigama steering als wesentlicher Baustein eines fundierten Entscheidungsunterstützungssystems für den Bewässerungslandbau. Als weiterführende wissenschaftliche Fragestellungen haben wir identifiziert:

- Überarbeitung der AET/PET-Steuerkurven für neue Fruchtarten und Sorten unter den Bedingungen des Klimawandels, am besten realisierbar über eine Kombination von Lysimeteruntersuchungen und pflanzenbaulichen Exaktversuchen
- Entwicklung von Methoden zur Erfassung des Wasserbedarfs von Kulturen unter den Bedingungen des Biolandbaus und/oder bei nicht-wendender Bodenbearbeitung und Implementierung der Ergebnisse in Algorithmen der Zusatzwasserbedarfsermittlung, realisierbar in angewandten Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftspraxis
- Einbeziehung von Satellitendaten in die Bewässerungssteuerung; hier ist eine Kombination von Grundlagenforschung und Validierung unter Realbedingungen am besten geeignet.

6 Zusammenarbeit der operationellen Gruppe

Die Zusammenarbeit war durch ein konstruktives und vertrauensvolles Verhältnis zwischen den OG-Partnern gekennzeichnet. Die OG hat sich zweimal jährlich für ein mehrstündiges Projekttreffen zusammengefunden, in welchem Ergebnisse diskutiert und anstehende Aufgaben verteilt wurden. Während der Bewässerungssaison war die Zusammenarbeit sehr intensiv, da erheblicher Abstimmungsbedarf bei der logistisch-ackerbaulichen Planung und Umsetzung der Bewässerung bestand. Meist wurde dazu ein Messengerdienst genutzt. Am jährlichen Bewässerungstag sowie bei anderen Projektveranstaltungen nahmen i.d.R. mehrere OG-Partner teil. Als besonders wertvoll für die Außenwirkung des Projektes hat sich

die Fähigkeit des OG-Partners Grünhagen Ackerbau GmbH erwiesen, Berufskollegen für Innovationen begeistern zu können.

Das Erreichen der Projektziele war ausschließlich durch den gewählten Zusammenschluss von Wissenschaftlern, Landwirten, Beratern und KMU möglich. Bei einem reinen Forschungs- oder Technologievorhaben hätte ein Teil der Arbeitsaufgaben von Außenstehenden geleistet werden müssen. Mitglieder der OG haben bereits neue Initiativen für eine weitere Zusammenarbeit auf den Weg gebracht.

Die OG *Precision Irrigation* stand in regem Austausch mit anderen EIP-Bewässerungsprojekten in Deutschland, besonders mit den Projekten SeBeK, Aqua C+ und GS-Netz. Gemeinsam mit der Hochschule Suderburg (SeBeK) wurde in 2018 ein Workshop zum Thema Nachhaltige Bewässerung organisiert und durchgeführt. Ein ebenfalls intensiver Austausch bestand zum spanischen EIP-Projekt VINECO, welches sich mit dem Einsatz von Infrarot-Thermographie im Weinbau beschäftigt hat.

7 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Die Verbreitung der Projektergebnisse erfolgte durch organisierte Veranstaltungen, Teilnahme auf Messen, Vorträge und Beiträge in Fachzeitschriften. Der Transfer in die landwirtschaftliche Praxis basierte u. a. auf Testeinsätzen von Irrigama steering-Prototypen in mehr als ein Dutzend Landwirtschaftsbetrieben und dem jährlichen Erfahrungsaustausch v. a. bei den Bewässerungstagen.

EIP-AGRI hat sich für die OG *Precision Irrigation* als effizientes Werkzeug für die Innovationsförderung in der Landwirtschaft erwiesen. Der erforderliche Zusammenschluss unterschiedlicher Akteure zur Umsetzung praxistauglicher Lösungen füllt Lücken zwischen Forschung und Praxis, da ein vergleichbares Förderinstrument bislang nicht existierte. Gerade für anwendungsnah agierende Forschungseinrichtungen und innovationsfreudige Praxisbetriebe ergibt sich so die Möglichkeit, vielversprechende, aber möglicherweise auch (wirtschaftlich) riskante Lösungen praktisch auszuprobieren. Die Forschenden können dabei ihre Expertise stärken, während Praktiker die notwendige Sicherheit erhalten.

Literaturverzeichnis

Dakka, R.S., Kondekar, R.N., Gaopande, L.V. (2015): Modified Wallis filter for improving the local contrasts of GIS related Images. United States Patent Application Publication, No. US 2015/0324641 A1.

Geisler, G. (1980): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch – Biologie, Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 479 S.

- Kersebaum, K.C. (2011): Special features of the HERMES model and additional procedures for parameterization, calibration, validation, and applications. In: Ahuja, L.R., Ma, L. (ed.): Advances in Agricultural Systems Modeling Series 2. ASA, CSSA, SSSA, Madison, USA, S. 65-94.
- Kustas, W.P., Norman, J.M. (1997): A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. *Water Resources Research* 33 (6), 1495-1508.
- Kustas, W.P., Norman, J.M. (1999): Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forestry Meteorology* 94 (1), 13-29.
- Lück, E., Rühlmann, J. (2013): Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS – Information about lateral and vertical soil heterogeneity. *Geoderma* 199, 2-11.
- Nielsen, D.C., Gardner, B.R. (1987): Scheduling Irrigation for corn with the Crop Water Stress Index (CWSI). *Applied Agricultural Research* 2 (5), 295-300.
- Nieto, H., Kustas, W.P., Torres-Rúa, A., Alfieri, J.G., Gao, F., Anderson, M.C., White, W.A., Song, L., del Mar Alsina, M., Prueger, J.H., McKee, M., Elarab, M., McKee, L.G. (2019): Evaluation of TSEB turbulent fluxes using different methods for the retrieval of soil and canopy component temperatures from UAV thermal and multispectral imagery. *Irrigation Science* 37 (3), 389-406.
- O'Shaugnessy, S.A., Andrade, M., Evett, S., Colaizzi, P. (2016): An Irrigation Scheduling SCADA System. *Resource*, S. 10-12.
- Schlepphorst, R., Zimmermann, B., Junghans, V. (2020): Gesucht: Stationäre Bewässerungsanlagen. *Bauernzeitung*, 12. Woche, S. 37.
- Schneekloth, J.P., Nielsen, D.C. (2011): Irrigation capacity impact on limited irrigation management and cropping systems. *Proceedings of the 23rd Annual Central Plains Irrigation conference*, Colby, Kansas. S. 1-9.
- Simon, M., Engel, W. (1986): Zur Durchsetzung der rationellen Wasserverwendung bei der Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen im Bezirk Magdeburg. *Wasserwirtschaft Wassertechnik* 36, 170-172.
- Statistisches Bundesamt (2017): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben/Agrarstrukturerhebung 2016. 38 S.
- Zimmermann, B., Schlepphorst, R., Meinardi, D., Kraft, M. (2019): Mit Sensoren gegen Trockenstress. *Top Agrar* 10, 68-71.