



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 104 / Ausgabe 03

**Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis**

Entwicklung von Beikraut-Applikationskarten für den teilflächenspezifischen Pflanzenschutz

Technische Umsetzung und Ökonomische Bewertung

Jan Jänicke, Vladyslav Pitsyk, Nikita Genze, Johanna Pfrombeck, Stefan Kopfinger, Markus Gandorfer, Dominik Grimm und Michael Grieb

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Methoden	3
2.1 Datenerhebung	4
2.2 Annotation und KI-Training	6
2.3 Objekterkennung	7
2.4 Evaluationsmetriken	9
2.5 Applikationskarten	9
2.6 Ökonomische Bewertung	10
2.6.1 Modellierung teilflächenspezifischer Herbizidapplikation	11
2.6.2 Modellierung teilflächenspezifischer mechanischer Beikrautbekämpfung	13
2.6.3. Statistische Analyse	14
3 Ergebnisse und Diskussion	14
3.1 Bewertungsstufe 1: Technische Realisierbarkeit einer KI-generierten Beikrautkarte	14
3.1.1 Drohnenbefliegung	14
3.1.2 Maiserkennung	17
3.1.3 Erstellung einer Applikationskarte	20
3.1.4 Integration einer Beikrautkarte in die Feldrobotik	20
3.2 Bewertungsstufe 2: Ökonomische Bewertung	23
3.2.1 Teilflächenspezifische Herbizidapplikation	23
3.2.2 Teilflächenspezifische mechanische Beikrautregulierung	27
3.2.3 Limitationen der Beikrautkartierung als Entscheidungsgrundlage	28
4 Fazit	29
Zusammenfassung	30
Summary	31
Literatur	31
Anhang	35

1 Einleitung

Pflanzenschutzmaßnahmen sind ein zentraler Bestandteil einer produktiven, ertragsstabilen und langfristig ernährungssichernden landwirtschaftlichen Produktion. Ohne wirksame Maßnahmen zur Kontrolle von Schädlingen, Krankheitserregern und Beikräutern können erhebliche Ertragsverluste auftreten, die sowohl die Wirtschaftlichkeit landwirtschaftlicher Betriebe als auch die Stabilität der Produktion beeinträchtigen. Im Ackerbau stellen insbesondere Beikräuter eine wesentliche Herausforderung dar, da sie mit Kulturpflanzen um Ressourcen wie Licht, Wasser und Nährstoffe konkurrieren (RAJCAN und SWANTON, 2001) und dadurch signifikante Ertragsverluste verursachen können (NUTTER et al., 1993).

In der landwirtschaftlichen Praxis erfolgt die Beikrautregulierung bislang überwiegend durch den Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel. Deren Anwendung ist jedoch mit ökologischen und toxikologischen Risiken verbunden (MAUSER et al., 2024). So können sie Nichtzielorganismen beeinträchtigen, zu einer möglichen Exposition des Menschen führen und durch Abdrift auch Wirkungen außerhalb der behandelten Flächen hervorrufen (BAMAL et al., 2024; ALBASEER et al., 2025; WAN et al., 2025). Darüber hinaus werden sie mit Biodiversitätsverlusten in Zusammenhang gebracht (MAUSER et al., 2024). Gleichzeitig steigen die Anforderungen an das Beikrautmanagement infolge zunehmender Herbizidresistenzen, einer sinkenden Verfügbarkeit zugelassener Wirkstoffe sowie der Auswirkungen des Klimawandels (BARMAN et al., 2014). Hinzu kommen politische Bestrebungen, den Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel zu reduzieren. Die Europäische Union fordert im Rahmen des European Green Deal ("Farm to Fork") eine Reduktion des Einsatzes chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel um 50 % bis 2030 (EU, 2020). Als etablierte Alternative zur chemisch-synthetischen Beikrautregulierung gilt die mechanische Beikrautregulierung. Sie kann die Herbizidabhängigkeit reduzieren, ist jedoch häufig mit einem erhöhten Arbeitszeit-, Maschinen- und Kostenaufwand verbunden. Zudem können unter bestimmten Standortbedingungen negative Nebeneffekte auftreten. Insbesondere auf erosionsgefährdeten Böden und in Hanglagen kann mechanische Bearbeitung die Bodenstruktur beeinträchtigen und damit das Risiko für Bodenabtrag erhöhen (z. B. (MOHLER et al., 2001; GUMMERT et al., 2012)).

Vor diesem Hintergrund werden neue Verfahren benötigt, die sowohl effizient und wirksam als auch unter variablen Beikrautdrücken und engen ökonomischen Rahmenbedingungen praktikabel sind. Fortschritte in der Digitalisierung eröffnen hierfür neue Möglichkeiten. Technologien wie Drohnen, Sensorik, moderne Maschinenteknik und Verfahren der künstlichen Intelligenz schaffen die Voraussetzung für eine präzisere, selektive und potenziell ressourcenschonendere Beikrautregulierung.

Ein zentraler Anwendungsfall in diesem Zusammenhang ist der teilflächenspezifische Pflanzenschutz. Dabei erfolgt die Beikrautregulierung räumlich differenziert in Abhängigkeit von der tatsächlichen Verteilung des Beikrautauftretens innerhalb eines Feldes. Studien zeigen, dass ein solches Management zu Einsparungen von Pflanzenschutzmitteln beitragen und zugleich die Biodiversität fördern kann, ohne zwangsläufig Ertragsverluste oder zusätzliche Regulierungskosten in den Folgejahren zu verursachen (GERHARDS et al., 2022).

Über den chemischen Pflanzenschutz hinaus erscheint auch eine teilflächenspezifische Anwendung mechanischer Verfahren auf Basis von Beikrautkarten vielversprechend. Durch gezielte Bearbeitung einzelner Teilflächen kann dabei das Risiko von Bodenerosion insbesondere auf erosionsgefährdeten Standorten verringert werden (CHANEY et al., 1985; NEARING und BRADFORD, 1985; MOHLER et al., 2001). Trotz der potenziellen Vorteile digitaler Technologien ist deren Adoptionsrate in der bayerischen Landwirtschaft bisher gering, wobei unter anderem eine fragliche Wirtschaftlichkeit als zentrales Hemmnis angegeben wird (GABRIEL und GANDORFER, 2023). Die Forschung zur Wirtschaftlichkeit des teilflächenspezifischen Beikrautmanagements ist begrenzt, viele Studien berücksichtigen Verfahrenskosten nur unvollständig oder beruhen nicht auf empirischen Daten (PITSYK et al., 2025). Zudem erfordert die Umsetzung strukturierte Arbeitsabläufe von der Datenerhebung über die robuste Beikrauterkenennung bis zur fertigen Applikationskarte. Die technische Realisierbarkeit mechanischer Teilflächenbehandlung wurde dabei bisher kaum untersucht. Die Integration von Applikationskarten in autonome Feldroboter könnte in diesem Kontext eine praktikable Lösung zur Effizienzsteigerung bieten.

Das Forschungsprojekt "Entwicklung und Bewertung von Beikraut-Applikationskarten für den Einsatz von Robotern zur mechanischen Beikrautregulierung" (EWIS2) erforscht daher, wie sich die Stärken des teilflächenspezifischen Bewirtschaftungskonzepts mit den Vorteilen des mechanischen Pflanzenschutzes durch den Einsatz von Feldrobotern kombinieren lassen. Ziel ist es, aufzuzeigen, wie Beikräuter in Drohnenaufnahmen erkannt und daraus Applikationskarten entwickelt werden können. Dabei soll darauf eingegangen werden, welche Herausforderungen bei der Drohnenaufnahme bestehen, wie gut die Kulturpflanzen und Beikräuter mit Hilfe von künstlicher Intelligenz erkannt werden können und wie daraus Applikationskarten erstellt und in den Roboter integriert werden können. Weiterhin wird der teilflächenspezifische Pflanzenschutz, chemisch-synthetisch wie auch mechanisch, mithilfe von Drohnen ökonomisch bewertet.

2 Methoden

Die Bewertung des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes auf Basis von Applikationskarten wurde zweistufig durchgeführt. In Stufe 1 wurde die technische Realisierbarkeit autonomer mechanischer, teilflächenspezifischer Pflanzenschutzverfahren untersucht, beginnend bei der Drohnenbefliegung,

über die Kultur- und Beikrauterkenennung, die Erstellung von Applikationskarten bis hin zur Integration und Anwendung im autonomen Feldroboter. In Stufe 2 erfolgte eine ökonomische Bewertung des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes.

2.1 Datenerhebung

Die Drohnenbefliegungen wurden in den Jahren 2024 und 2025 durchgeführt. Dabei wurden sowohl landwirtschaftliche Versuchsflächen als auch Praxisflächen mit den Kulturen Mais und Sorghum befliegen. Die 81 befliegenen Flächen befanden sich im südöstlichen Bayern (siehe Abbildung 1).

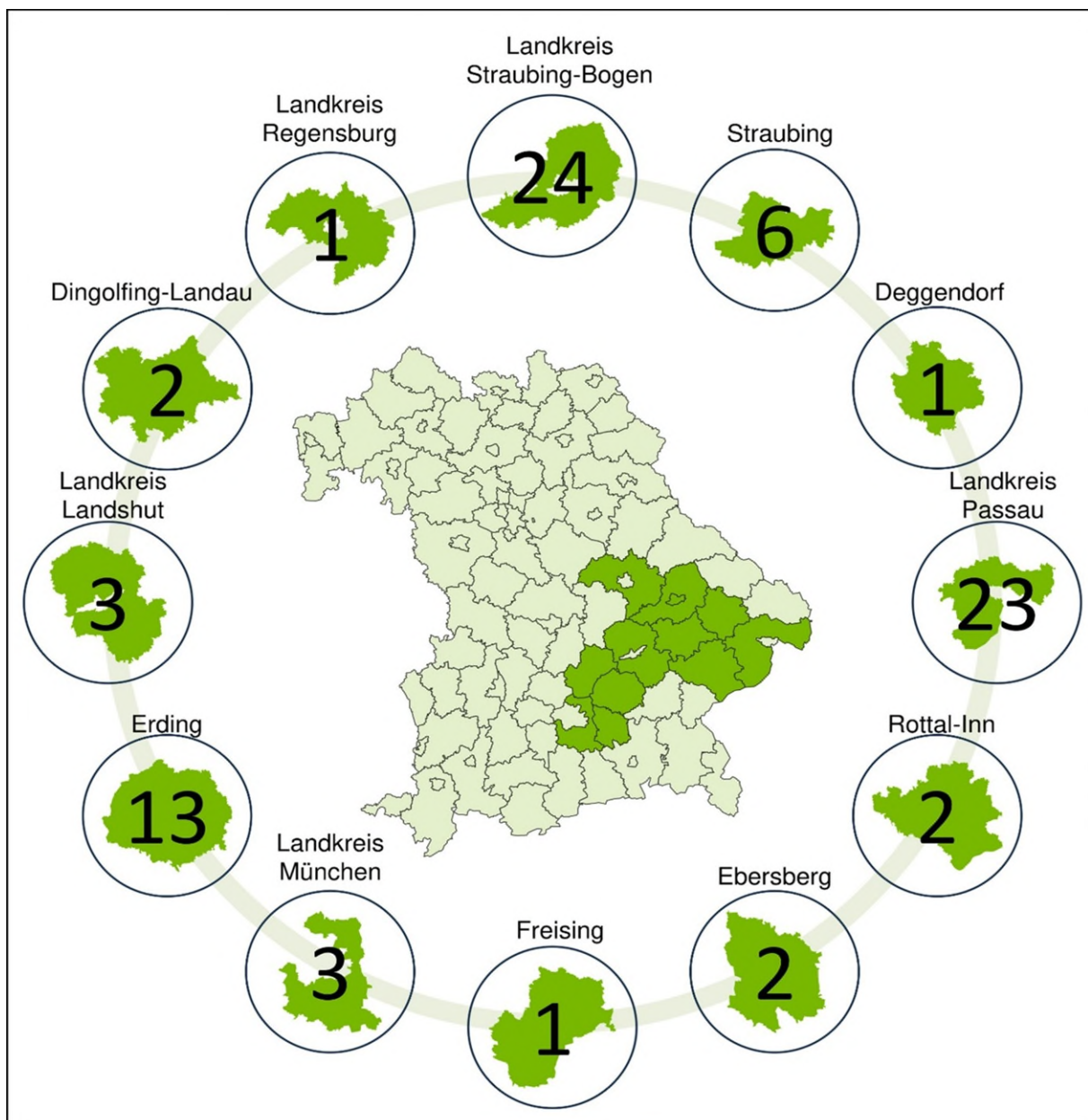


Abbildung 1: Übersicht der befliegenen Flächen in Bayern

Bei der Flächenauswahl wurde darauf geachtet, ein möglichst vielfältiges Spektrum für in dieser Region übliche Flächen abzubilden. Die Auswahl fiel dementsprechend auf Flächen mit verschiedenen Bewirtschaftungsweisen, Bodenbearbeitungssystemen und Bodentypen. Dadurch konnte ein Datensatz mit diverser Bodentextur, Oberflächenfarbe und Beikrautflora aufgenommen werden. Explizit wurden auch Hangflächen befliegen, da diese im Hinblick auf das Erosionsminderungspotential der teilflächenspezifischen mechanischen Beikrautregulierung besonders relevant sind. Die Aufnahmen wurden in einem frühen Entwicklungsstadium der Kulturpflanze durchgeführt, um Daten im relevanten Zeitraum kurz vor der üblichen Pflanzenschutzmaßnahme in Mais und Sorghum zu erheben. Die Befliegungen erfolgten überwiegend im BBCH-Stadium 12 – 13 und teilweise auch in einem späteren Stadium (bis zu BBCH 16).

Zur Erhebung der Bilddaten kamen zwei Drohnensysteme zum Einsatz: eine DJI Matrice 300 RTK in Kombination mit einem DJI Zenmuse P1 Sensor (45 MP) und einem 35 mm Standardobjektiv (M300) sowie eine DJI Mavic 3M (M3M). Für die Aufnahmen mit der M3M wurde ausschließlich die 20-MP-RGB-Kamera genutzt. Beide Drohnen sind zur präzisen GNSS-Positionierung mit einem RTK-Sensor ausgestattet. Die Planung der Flugrouten erfolgte im Jahr 2024 mit der Software FlightHub2 (DJI). Im Jahr 2025 wurde hingegen die Software UgCS (SPH Engineering) eingesetzt, da dadurch eine reibungslose Befliegung von Hangflächen gewährleistet werden konnte. Durch den Import eines hochauflösten Digitalen Geländemodells (DGM) und die Nutzung der Funktion "Smart AGL" konnte Terrain Follow mit konstanter Flughöhe über dem Boden realisiert werden.

Für die beiden Bewertungsstufen wurden Befliegungen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. In Stufe 1 zur technischen Realisierbarkeit lag der Fokus auf der Effizienz der Drohnenbefliegung. Hierfür wurde eine Ground Sampling Distance (GSD) von 0,30 cm/px bei einer Fluggeschwindigkeit von 3 m/s gewählt. Als Datengrundlage für die KI-basierte Maiserkennung wurden 15 Befliegungen herangezogen.

In Stufe 2 zur ökonomischen Bewertung erfolgten die Befliegungen mit einer GSD von 0,15 cm/px. Der Überlappingsgrad betrug sowohl in Flugrichtung als auch seitlich 75 %. Die Fluggeschwindigkeit entsprach mit 3 m/s der in Experiment 1 verwendeten Einstellung. Die Beikrautererkennung der hierfür erhobenen Daten wurde durch einen externen Dienstleister durchgeführt. Dadurch wurde neben der Quantifizierung der detektierten Beikräuter auch eine Klassifizierung in monokotyle und dikotyle Arten vorgenommen, was eine präzisere Modellierung für die ökonomische Bewertung ermöglichte.

Alle Flächen, die für die beiden Experimente herangezogen wurden, sind in den Tabellen im Anhang aufgeführt (Anhang 1, Anhang 2).

2.2 Annotation und KI-Training

Ziel von Stufe 1 war es, die technische Realisierbarkeit der Erstellung einer drohnenbasierten Beikrautkarte sowie deren Anwendung durch einen autonomen Feldroboter zu erproben. Dabei wurden die folgenden sechs Schritte durchgeführt (siehe Abbildung 2).

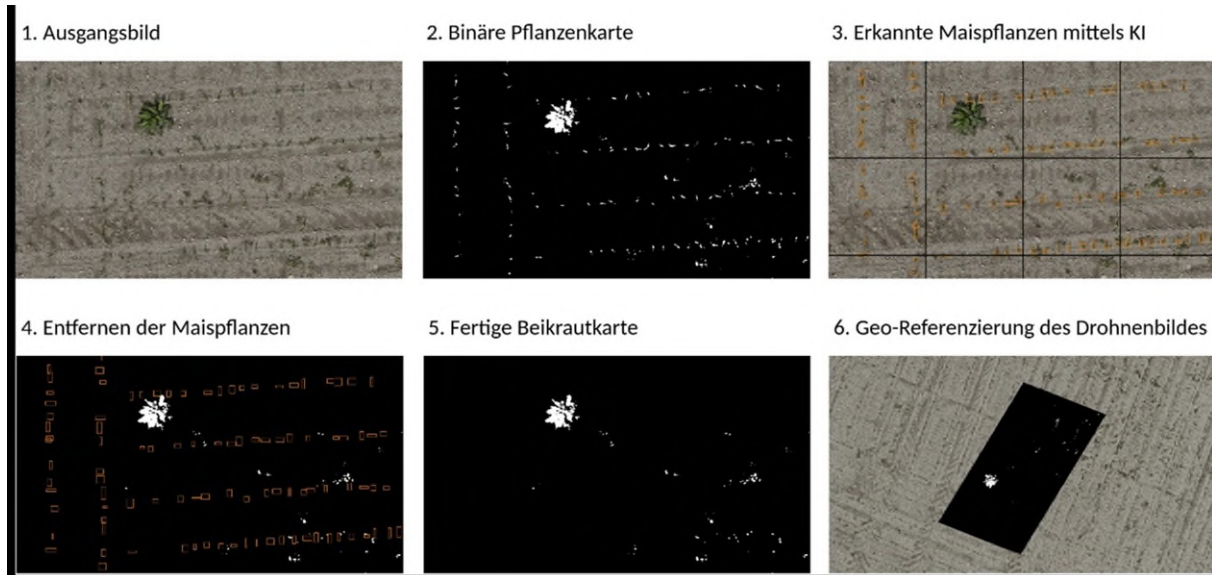


Abbildung 2: Schritte vom Drohnenbild zur georeferenzierten Beikrautkarte

Als Grundlage dienen die im ersten Schritt aufgenommenen Drohnenbilder. Im zweiten Schritt wurden binäre Masken erstellt, welche die gesamte grüne Vegetation im Bild abbilden. Dazu wurden grüne Pixel im HSV-Bildraum ausgewählt und anschließend mit morphologischen Operatoren gefiltert. Im dritten Schritt wurde ein vorher trainiertes KI-Modell zur Objekterkennung angewendet, um Maispflanzen in einzelnen Bildausschnitten (dargestellt über das Raster im Bild oben rechts) vorherzusagen. Diese Maispflanzen konnten im folgenden Schritt von der Vegetation entfernt werden, wodurch eine Beikrautkarte entstand. Diese Beikrautkarte beinhaltet die Beikräuter jedoch nur in lokalen Bildkoordinaten, die im letzten Schritt zu GNSS-Koordinaten umgerechnet wurden.

Um das Training von KI-Modellen zu ermöglichen, wurden einzelne Maispflanzen in verschiedenen Wachstumsstadien und auf unterschiedlichen Feldern annotiert, indem rechteckige Begrenzungsrahmen gesetzt wurden. Diese manuelle Annotation war mit einem durchschnittlichen Zeitaufwand von zwei Stunden pro Drohnenbild sehr zeitaufwändig, ist jedoch für ein robustes Modelltraining unerlässlich.

Das Experiment zur Anwendung am autonomen Feldroboter zielt auf die Erkennung von Beikraut in Maisbeständen im frühen Wachstumsstadium ab, weshalb für das KI-Training nur Flächen mit Mais im Wachstumsstadium BBCH 12 – 13 ausgewählt wurden. Dies entspricht 15 Drohnenbefliegungen mit insgesamt 71 annotierten Bildern. Anschließend wurden die Daten basierend auf einzelnen Drohnenbildern in Trainings-, Validierungs- und Testset unterteilt. Dadurch wurde sichergestellt, dass

die beflogenen Flächen anteilig mit der gleichen Häufigkeit in allen Teil-Datensätzen vorkommen. So kann das KI-Modell adäquat trainiert, validiert und objektiv getestet werden. Um das System in Zukunft pragmatisch anwendbar zu machen, wurden die Drohnenbilder so wenig vorverarbeitet, wie nötig. Sie wurden nur in kleinere Bildausschnitte ($1024 \times 1024 \text{ px}^2$) eingeteilt, um Modelle auf einer Grafikkarte effizient trainieren zu können. Zusätzlich wurden die Bilder im Trainingsset durch folgende Augmentierungen künstlich verändert, um die Variabilität innerhalb der Trainingsdaten zu erhöhen: CLAHE (lokale Kontrastverbesserung), Spiegelungen und Rotationen. Zusätzlich wurde Gaußsches Rauschen und zufällige Sonnenblendung verwendet, um die geringere Anzahl an Trainingsbildern mit direkter Sonneneinstrahlung zu kompensieren. Wie bei der Objekterkennung üblich, wurden außerdem die Methoden MixUp (ZHANG et al., 2018) und Mosaic (DADBOUD et al., 2021) verwendet. MixUp vermischt zwei zufällige Trainingsbilder und deren Labels durch eine gewichtete lineare Kombination, sodass das Modell lernt, zwischen verschiedenen Klassen zu interpolieren. Mosaic kombiniert hingegen verschiedene Trainingsbilder in einem einzigen Raster, was besonders bei der Objekterkennung hilft, da das Modell lernt, Objekte in unterschiedlichen Kontexten und kleineren Maßstäben zu identifizieren. Trainiert wurde auf einer Batch Size von 16.

2.3 Objekterkennung

Die Klassifizierung von Objekterkennungsalgorithmen erfolgt primär durch die Unterscheidung zwischen Single-Stage-Detektoren und Two-Stage-Detektoren. Während Two-Stage-Detektoren der R-CNN-Modelle (z. B. Faster R-CNN) (GIRSHICK, 2015) in einem ersten Schritt potenzielle Objektregionen vorschlagen und diese in einem zweiten Schritt klassifizieren sowie verfeinern, was zu einer hohen Lokalisierungsgenauigkeit bei gleichzeitig höherem Rechenaufwand führt, eliminieren Single-Stage-Ansätze diesen Zwischenschritt. Diese Modelle, z.B. YOLO (You Only Look Once) (REDMON et al., 2016) oder SSD (Single Shot MultiBox Detector) (LIU et al., 2016), behandeln die Objekterkennung als ein Regressionsproblem, bei dem Begrenzungsrahmen in einem einzigen Durchlauf des neuronalen Netzes direkt vorhergesagt werden. Dieser konzeptionelle Unterschied führt dazu, dass Single-Stage-Algorithmen signifikante Geschwindigkeitsvorteile bieten und somit eine Echtzeit-Verarbeitung ermöglichen, während Two-Stage-Verfahren kleine oder überlappende Objekte präziser erkennen.

Die Wahl von YOLO zur Detektion von Maispflanzen in Drohnenbildern begründet sich primär in der effizienten Balance zwischen Echtzeit-Verarbeitungsgeschwindigkeit und hoher Lokalisierungspräzision. Da Drohnenbefliegungen von Maisfeldern oft Datenmengen im Gigabyte-Bereich generieren, ermöglicht die Single-Stage-Architektur von YOLO eine signifikant schnellere Prozessierung der Bilder im Vergleich zu rechenintensiven Two-Stage-Detektoren wie Faster R-CNN. Zudem ist YOLO durch seine globale Betrachtung des Bildes während des Trainings robust gegenüber kontextuellen Fehlern. Die Architektur ist zudem hochgradig skalierbar, sodass das Modell auch auf

mobilen Edge-Geräten direkt am Feld für eine sofortige Analyse eingesetzt werden kann. Dies ist entscheidend für die zeitnahe Erstellung von Applikationskarten, um agronomische Maßnahmen ohne signifikante Latenz einzuleiten. Zusätzlich zur strukturellen Vereinfachung führt YOLO26 (SAPKOTA et al., 2025), die aktuell neuste Version, spezialisierte Mechanismen zur Steigerung der Detektionsgüte ein. Zum Beispiel wird ein MuSGD-Optimierer verwendet, der eine Mischung aus SGD (AMARI, 1993) und Muon (LIU et al., 2025) ist und vom Training von großen Sprachmodellen inspiriert wurde. Dadurch können Modelle stabiler trainiert werden und konvergieren schneller. Außerdem verwendet YOLO26 verbesserte Fehlerfunktionen, die besonders bei der Erkennung kleiner Objekte helfen sollen, indem sie die Verlustgewichtung während der Trainingsphasen dynamisch an die Objektskalierung anpassen. Die Architektur von RT-DETR (Real-Time Detection Transformer) (ZHAO et al., 2024) markiert einen Paradigmenwechsel in der Echtzeit-Objekterkennung, indem sie die globale Aufmerksamkeitssteuerung von Transformern mit der Effizienz konventioneller Detektoren synchronisiert. Im Zentrum steht ein hybrider Encoder, der die herkömmliche, rechenintensive Self-Attention (VASWANI et al., 2017) durch eine entkoppelte Struktur ersetzt: Er trennt die Extraktion intra-skalärer Merkmale von der inter-skalaren Fusion. Durch diesen technologischen Ansatz werden redundante Berechnungen innerhalb der Merkmalsauflösungen minimiert. Ein entscheidender Effizienzvorteil gegenüber der YOLO-Familie resultiert aus der Implementierung einer "Uncertainty-Aware Query Selection". Anstatt den Decoder mit einer fixen oder rein positionsbasierten Anzahl an Objektanfragen (Queries) zu belasten, filtert RT-DETR hochgradig informative Bildregionen basierend auf einer kombinierten Analyse von Klassifikationskonfidenz und Lokalisierungssicherheit vor. Dieser probabilistische Selektionsmechanismus optimiert die Ressourcenallokation des Modells, da die rechenintensive Transformer-Interaktion gezielt auf Bildbereiche mit hoher Konfidenz hinsichtlich des Vorhandenseins eines Objekts konzentriert wird, wodurch die Inferenzlatenz bei gleichbleibender Präzision signifikant reduziert wird. Die YOLO-Familie bietet verschiedene Modellskalierungen von Nano (n) über Small (s), Medium (m) und Large (l) bis hin zu Extra Large (x), die sich in der Tiefe und Breite des neuronalen Netzes unterscheiden, um ein optimales Gleichgewicht zwischen Rechengeschwindigkeit und Detektionsgenauigkeit für unterschiedliche Hardware-Ressourcen zu ermöglichen. Für RT-DETR wurden hingegen nur die Varianten Large (l) und Extra Large (x) veröffentlicht.

Im Gegensatz zu klassischen CNN-basierten Detektoren fungiert RT-DETR als echtes End-to-End-System, das auf Non-Maximum Suppression (NMS) (HOSANG et al., 2017) verzichtet. NMS zielt darauf ab, Mehrfachdetektionen desselben Objekts zu entfernen. Da Deep-Learning-Modelle wie YOLO26 dazu neigen, für eine einzelne Maispflanze mehrere überlappende Begrenzungsrahmen mit unterschiedlichen Konfidenzwerten vorzuschlagen, dient NMS als Filterinstanz. Dieser Algorithmus sortiert zunächst alle vorgeschlagenen Boxen absteigend nach ihrer Vorhersagewahrscheinlichkeit.

Der Begrenzungsrahmen mit dem höchsten Konfidenzwert wird als Referenz gewählt, während alle anderen Rahmen, die mit dieser Referenzbox stark überlappen, unterdrückt werden. Dieser Prozess wird iterativ für alle verbleibenden Detektionen wiederholt. Im Kontext dieses Experiments stellt NMS sicher, dass keine künstlichen Doppelzählungen entstehen, sondern pro physische Pflanze lediglich der präziseste Begrenzungsrahmen in die finale Auswertung einfließt. Dieser nachgelagerte, schwer parallelisierbare Schritt ist fehleranfällig und rechenintensiv. Im Kontrast dazu erzeugt die Transformer-Struktur über ein bipartites Matching direkt eine eindeutige 1-zu-1-Zuweisung pro Objekt. Dies eliminiert unvorhersehbare Latenzspitzen im Post-Processing und ist für zeitkritische Ansteuerung von Aktorik in der Feldrobotik unerlässlich. Technologisch betrachtet bietet RT-DETR eine überlegene Robustheit gegenüber Okklusionen und variablen Lichtverhältnissen, da die Self-Attention-Mechanismen weniger anfällig für lokale Bildstörungen sind, als rein lokale Faltungsoperationen. Für den Einsatz in der automatisierten Bonitur oder präzisen Applikationstechnik stellt diese Architektur eine hochperformante Lösung dar, die die spektrale und räumliche Komplexität agrarwirtschaftlicher Flächen mit der notwendigen Echtzeitfähigkeit auf modernen Edge-Computing-Einheiten vereint. Dies ermöglicht eine Skalierung der KI-gestützten Analyse auf autonom agierende Systemeinheiten ohne Rückgriff auf Cloud-Infrastrukturen.

2.4 Evaluationsmetriken

Bei der Evaluierung von Objekterkennungsmodellen werden die Vorhersagen in folgende Gruppen eingeteilt: True Positives (TP), False Positives (FP) und False Negatives (FN). True Negatives (TN) bleiben in diesem Kontext meist unberücksichtigt, da der Hintergrund eines Bildes keine diskreten Objekte definiert. Eine Detektion gilt dabei nur dann als TP, wenn die Klassenzuweisung korrekt ist und die räumliche Überlappung zwischen dem vorhergesagten Begrenzungsrahmen und der Grundwahrheit, gemessen als Intersection over Union (IoU), einen festgelegten Schwellenwert überschreitet. Andernfalls wird die Detektion als FP gewertet. Nicht erkannte Objekte zählen als FN. Die Metrik Precision ($TP / (TP + FP)$) gibt Aufschluss über die Genauigkeit der Vorhersagen, wohingegen der Recall ($TP / (TP + FN)$) die Vollständigkeit der Erkennung beschreibt. Um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen diesen oft gegenläufigen Werten zu finden, wird der F1-Score als harmonisches Mittel aus Precision und Recall berechnet, was eine präzise Beurteilung der Modellperformance ermöglicht.

2.5 Applikationskarten

In der modernen Landwirtschaft gelten Orthofotos als unverzichtbare, geometrisch korrigierte Datengrundlage, die eine verzerrungsfreie Analyse ganzer Schläge ermöglicht. Der entscheidende Vorteil liegt in der präzisen Georeferenzierung im Vergleich zu Einzelaufnahmen. Orthofotos erlauben es, kleinräumige Heterogenitäten wie Beikrautnester oder Erosionsschäden zentimetergenau zu

lokalisieren. Demgegenüber stehen signifikante Nachteile: Die Erstellung ist rechenintensiv und erfordert spezialisierte Photogrammetrie-Software sowie fundiertes Expertenwissen bei der Datenprozessierung. Zudem sind Orthofotos lediglich statische Momentaufnahmen. Dadurch, dass Drohnen auf das Wetter angewiesen sind, gibt es nur wenige Zeitfenster für die Befliegung. Die zeitliche Verzögerung zwischen Bildaufnahme und fertiger Applikationskarte kann dazu führen, dass die Daten bei schnell wachsenden Beständen zum Zeitpunkt der Ausbringung bereits nicht mehr aktuell sind oder das Zeitfenster für eine Beikrautbekämpfung bereits vorbei ist. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit auf die Erstellung von Orthofotos zur anschließenden Berechnung der Beikrautverteilung verzichtet.

Stattdessen verwenden wir das Tool Drone-Footprints¹, um die geographische Ausdehnung von Drohnenbildern zu berechnen und diese einzeln als georeferenzierte GeoTIFFs zu speichern. Dadurch wird der aufwendige Schritt des Stitchings zu einem Orthofoto gespart. Grundsätzlich verwendet das Tool die in den Drohnenaufnahmen gespeicherten Metadaten, insbesondere die GNSS-Koordinaten, die Winkel des Gimbals und Kameraspezifikationen, wie Sensorgröße und Brennweite, um das Sichtfeld der Kamera zu bestimmen. Danach werden die Ecken des Bildes auf die Erdoberfläche projiziert, um eine Lokalisierung des Drohnenbildes in GNSS zu erhalten.

2.6 Ökonomische Bewertung

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines teilflächenspezifischen Beikrautmanagements im Maisanbau wurde ein auf empirischen Daten beruhender Modellansatz gewählt. Da die Wirtschaftlichkeit teilflächenspezifischer Verfahren wesentlich von der räumlichen Verteilung und der Dichte des vorhandenen Beikrauts abhängt, wurden Beikrautkarten mehrerer Maisfelder als Eingangsdaten in ein ökonomisches Modell integriert. Die Datengrundlage bildeten hochauflösende, auf Drohnenaufnahmen basierende Beikrautkarten von 19 konventionell und 8 ökologisch bewirtschafteten Maisfeldern in Bayern aus den Jahren 2024 und 2025, mit einer GSD von 0,15 cm/px. In der Analyse wurden unterschiedliche Managementansätze für beide Bewirtschaftungssysteme untersucht, wobei zwischen teilflächenspezifischer Herbizidapplikation im konventionellen und teilflächenspezifischer mechanischer Beikrautregulierung im ökologischen Anbau unterschieden wurde.

¹ <https://github.com/spifftek70/Drone-Footprints>

2.6.1 Modellierung teilflächenspezifischer Herbizidapplikation

Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wurde für die 19 konventionell bewirtschafteten Felder der Gewinnbeitrag (€/ha) einer teilflächenspezifischen Herbizidapplikation im Vergleich zu einer ganzflächigen Applikation berechnet. Der Gewinnbeitrag berücksichtigt je nach Szenario Veränderungen bei folgenden Kostenpositionen: Applikationstechnik, Drohnenbefliegung, Erstellung von Beikrautkarten und Herbizidkosten. Weiterhin wurden szenarienabhängig resultierende Ertragseffekte bei der Modellierung des Gewinnbeitrags berücksichtigt. Für die Ermittlung des Gewinnbeitrags wurden durchschnittliche Betriebsmittel- sowie Erzeugerpreise (z. B. Herbizidkosten) sowie durchschnittliche Maiserträge als Mittelwerte der Jahre 2020 bis 2024 für Bayern zugrunde gelegt. In der Auswertung wurden mehrere Kostenszenarien für die eingesetzten Technologien betrachtet (siehe Tabelle 1).

Im Basisszenario (Szenario 1) wurde ein landwirtschaftlicher Betrieb betrachtet, der die Technik zur teilflächenspezifischen Herbizidapplikation auf einer Fläche von 40 ha einsetzt und sowohl die Drohnenbefliegung als auch die Erstellung der Beikrautkarten als Dienstleistung in Anspruch nimmt. Es wurden die Mehrkosten berücksichtigt, die bei Anschaffung einer neuen Feldspritze mit einer Gestängebreite von 21 m entstehen, wenn die Funktion zur teilflächenspezifischen Applikation (Teilbreiten- bzw. Einzeldüsensteuerung) bereits beim Kauf als integrierte Ausstattung der Maschine mit erworben wird.

Die weiteren Szenarien (2 bis 5) variierten jeweils einzelne Parameter des Basisszenarios. In Szenario 2 wurde eine Einsatzfläche von 100 ha für die Applikationstechnik angenommen. Szenario 3 berücksichtigte anstelle der zusätzlichen Kosten bei Neuanschaffung einer Feldspritze die Kosten für einen herstellerunabhängigen Nachrüstsatz für eine teilflächenspezifische Applikation. In Szenario 4 wurde eine Gestängebreite von 15 m statt 21 m unterstellt. In Szenario 5 wurden die Annuität für die Anschaffung einer eigenen Drohne (Mavic 3 Enterprise, DJI) sowie der Zeitaufwand für die selbst durchgeführte Befliegung mit einem Lohnansatz von 30 €/h und die Kosten für die Erstellung der Beikrautkarten durch einen Dienstleister berücksichtigt.

Es wurde ein Zinssatz von 4 % p.a. angenommen. Die Kostenschätzung basiert auf bewusst optimistischen Annahmen hinsichtlich Nutzungsdauer (Drohne: 5 Jahre, Applikationstechnik: 15 Jahre) und Reparaturaufwand (5 % vom Anschaffungswert p.a.). Die Ergebnisse sind daher als Abschätzung der Wirtschaftlichkeit unter günstigen technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen zu interpretieren.

Tabelle 1: Szenarien zur ökonomischen Bewertung der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation

Szenario	Einsatzfläche [ha]	Drohnenbefliegung + Erstellung Beikrautkarte	Applikationstechnik	Breite Spritzgestänge [m]	Jährliche Kosten [€/ha]
1 (Basisszenario)	40	als Dienstleistung	Zusatzkosten für teilflächenspezifische Applikation bei Neuanschaffung	21	50-57
2	100	als Dienstleistung	Zusatzkosten für teilflächenspezifische Applikation bei Neuanschaffung	21	29-32
3	40	als Dienstleistung	Nachrüstsatz für teilflächenspezifische Applikation	21	130-150
4	40	als Dienstleistung	Zusatzkosten für teilflächenspezifische Applikation bei Neuanschaffung	15	50-55
5	40	Eigene Drohne + Beikrautkarte als Dienstleistung	Zusatzkosten für teilflächenspezifische Applikation bei Neuanschaffung	21	151-158

Für jedes konventionell bewirtschaftete Feld ($n = 19$) wurde der Gewinnbeitrag einer teilflächenspezifischen Herbizidapplikation für jedes der in Tabelle 1 dargestellten Szenarien bestimmt. Die vorhandenen Beikrautkarten der Felder wurden dazu in quadratische Rasterzellen unterschiedlicher Größen unterteilt, sodass für jede Zelle eine individuelle Entscheidung hinsichtlich einer Herbizidapplikation sowie ggf. der applizierten Herbizidmenge getroffen werden konnte. Zur Abbildung unterschiedlicher technischer Ausstattungsgrade von Feldspritzen mit Teilbreiten- bzw. Einzeldüsensteuerung wurden drei Rasterauflösungen ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$, $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ und $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$) analysiert. Darüber hinaus erfolgte für jedes Szenario ein Vergleich von drei alternativen Entscheidungsstrategien.

Ausgehend von einer vorhandenen Beikrautkarte für ein Feld existieren unterschiedliche Ansätze zur Entscheidungsfindung darüber, auf welchen Teilflächen eine Herbizidapplikation erfolgen soll. Dabei können sowohl agronomische Schwellenwerte, die sich am Beikrautaufwuchs orientieren, ab dem mit signifikanten Ertragseinbußen zu rechnen ist, als auch ökonomische Schwellenwerte, bei denen die durch Beikraut verursachten Ertragsverluste die Kosten der Beikrautbekämpfung übersteigen, als Entscheidungsgrundlage dienen. Im Rahmen der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden drei alternative Entscheidungsstrategien gegenübergestellt und bewertet:

1. "Ökonomischer Schwellenwert": Es erfolgt eine Herbizidapplikation, wenn der durch Beikrautaufwuchs bedingte Ertragsverlust die Kosten des Herbizids übersteigt. Die Ertragseinbußen durch Beikrautkonkurrenz wurden mithilfe eines Modells simuliert, das

sich am rechteckigen Hyperbelmodell (COUSENS, 1985), am Konzept der Konkurrenzindizes (COBLE et al., 1986) und am "Total Competitive Load" (NEESER et al., 2004; RIDER et al., 2006) orientiert. Damit konnte für jede 1 m x 1 m Rasterzelle der Konkurrenzdruck vorhandener monokotyler und dikotyler Beikräuter bestimmt und der zu erwartende Ertragsverlust berechnet werden.

2. "Null-Toleranz": Es erfolgt eine Herbizidapplikation in allen Teilflächen (Rasterzellen), in welchen sich mindestens ein Beikraut befindet.
3. "Dual-Dosis-Strategie": Hiermit wird ein Verfahren beschrieben, bei dem eine reduzierte Aufwandmenge ganzflächig ausgebracht wird, während die volle Aufwandmenge nur punktuell auf Teilflächen mit Beikraut (≥ 1 Pflanze) appliziert wird. Diese Strategie trägt dem Aspekt Rechnung, dass eventuell vorhandene Beikräuter nicht auf der Beikrautkarte erfasst sind, ist jedoch insbesondere im Hinblick auf mögliche Resistenzbildungen nur nach kritischer Überprüfung anzuwenden. In der vorliegenden Auswertung wurde beispielhaft eine um 50 % reduzierte, ganzflächige Aufwandmenge angenommen. Diese Annahme dient ausschließlich der Veranschaulichung und ist nicht als allgemeingültige Empfehlung zu verstehen. Die praktischen Anwendungsmöglichkeiten dieser Entscheidungsstrategie sind insbesondere bei der gemeinsamen Applikation von Herbiziden sowie aufgrund möglicher Resistenzentwicklungen eingeschränkt. Daher wurde dieses Entscheidungsszenario in der Analyse lediglich als Vergleichsvariante berücksichtigt.

2.6.2 Modellierung teilflächenspezifischer mechanischer Beikrautbekämpfung

Für die acht ökologisch bewirtschafteten Felder, für die in Summe zwölf Beikrautkarten vorlagen, wurde eine teilflächenspezifische mechanische Beikrautbekämpfung mittels Hacktechnik bewertet. Als Kennzahl diente die aktive Arbeitsfläche, die als Anteil der Feldfläche definiert ist, auf der eine mechanische Bearbeitung im Vergleich zu einer vollflächigen Bearbeitung durchgeführt wird. Als technische Grundlage wurde ein 3 m breites Hackgerät angenommen, wobei die untersuchten Felder in ein Raster mit einer Zellgröße von 3 m x 3 m unterteilt wurden. Für jede Rasterzelle wurde anschließend entschieden, ob eine mechanische Bearbeitung erfolgen soll. Für das ökologische Produktionssystem wurden verschiedene Schwellenwerte der Beikrautdichte verglichen, ab denen eine Bearbeitung der jeweiligen 3 m x 3 m Rasterzellen erfolgen soll:

- ≥ 5 Beikräuter/Rasterzelle ($\sim 0,5$ Beikräuter/m²)
- ≥ 10 Beikräuter/Rasterzelle ($\sim 1,1$ Beikräuter/m²)
- ≥ 27 Beikräuter/Rasterzelle ($\sim 3,0$ Beikräuter/m²)
- ≥ 45 Beikräuter/Rasterzelle ($\sim 5,0$ Beikräuter/m²)

Anhand der berechneten aktiven Arbeitsflächen konnte für jede Beikrautkarte die Fläche ermittelt werden, auf welcher das Hackgerät angehoben wird und dadurch Dieseleinsparungen möglich sind. Dabei wurde der Dieserverbrauch mithilfe des KTBL-Dieselbedarfsrechners (KTBL, 2026) berechnet, unter der Annahme einer durchschnittlichen Schlaggröße von 2 ha und eines 6-reihigen Hackgeräts, das vom Traktor mit einer Leistung von 67 kW betrieben wird. Der dafür angegebene Verbrauch lag bei 5,3 l/ha. Für die nicht zu bearbeitenden Flächen wurde ein Dieserverbrauch von 40 % dieses Wertes, also 2,1 l/ha, angesetzt. Der Dieselpreis wurde für die weitere Kalkulation mit 1,34 € pro Liter berücksichtigt.

2.6.3. Statistische Analyse

Die Datenverarbeitung und statistische Auswertung erfolgte mit R (v4.3.1). Um festzustellen, ob Unterschiede im Gewinnbeitrag (teilflächenspezifische Herbizidapplikation) oder in der aktiven Arbeitsfläche (teilflächenspezifisches Hacken) statistisch signifikant waren, wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Post-hoc-Vergleiche wurden mit dem Tukey-HSD-Test ($p < 0,05$) durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse werden entlang des zweistufigen Bewertungsansatzes differenziert dargestellt: Bewertungsstufe 1 adressiert die technische Realisierbarkeit KI-generierter Beikrautkarten und deren Integration in die Feldrobotik, Bewertungsstufe 2 die ökonomische Bewertung des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes, sodass technische Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit separat bewertet werden.

3.1 Bewertungsstufe 1: Technische Realisierbarkeit einer KI-generierten Beikrautkarte

Die technische Realisierbarkeit eines autonomen, mechanischen und teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes beinhaltet mehrere Schritte, wie in Abbildung 2 verdeutlicht wird

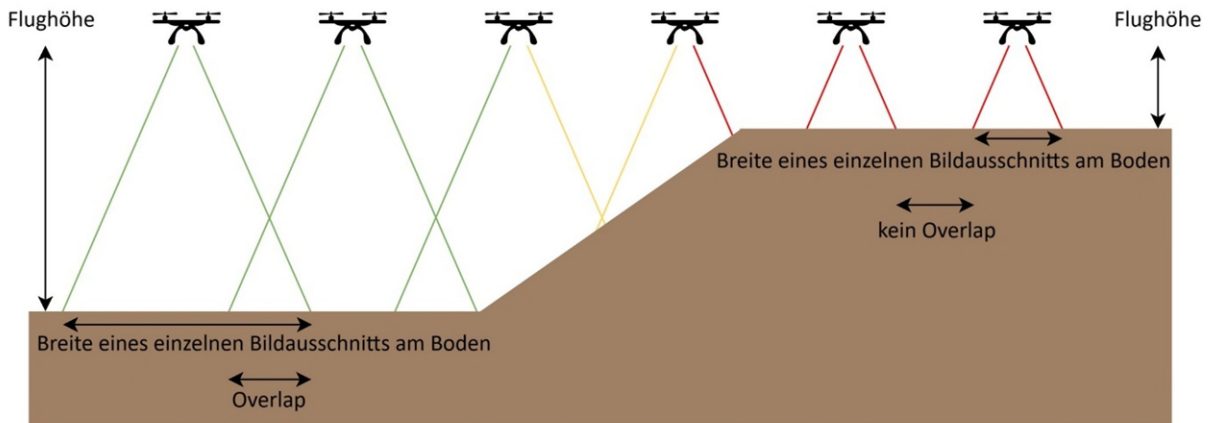
3.1.1 Drohnenbefliegung

Ein wichtiger Schritt zur technischen Realisierung von teilflächenspezifischem Pflanzenschutz ist die Datenerhebung mittels Drohne. Eine gleichbleibende Datenqualität, bei vertretbarem zeitlichem Aufwand ist dabei ein zentraler Erfolgsfaktor. In den Versuchen erwies sich dies jedoch als eine nicht zu unterschätzende Herausforderung, die durch geeignete Maßnahmen gezielt gesteuert werden kann.

Eine der Hauptproblematiken bei der Datenerhebung ist die vollständige Erfassung der Flächen mit gleichbleibender GSD bzw. Bildqualität. Dieses Problem trat gehäuft bei Aufnahmen aus dem Jahr 2024

auf. Dabei sind vor allem Hanglagen betroffen. Hervorgerufen wird diese Schwierigkeit durch die Einstellmöglichkeiten in der Befliegungssoftware. Die im Jahr 2024 verwendete Flugplanungssoftware (Flighthub2) ermöglicht die Option des Geländefolgenmodus, häufig englisch auch terrain follow genannt, nur ab Flughöhen von 25 m. Sowohl für die M3M als auch für die M300 liegt diese Flughöhe über der im Projekt möglichen Flughöhe, wodurch sich eine geringere Bodenauflösung der aufgenommenen Bilder ergibt. Somit konnte der terrain follow Modus nicht genutzt werden, was zur Folge hat, dass die Flughöhe konstant zum Startpunkt oder zum Meeresspiegel gehalten wird. Auf ebenen Flächen ist das unerheblich. Schon bei leichten Hangflächen ist dadurch eine Änderung des Bodenabstands und somit der GSD zu beobachten (Abbildung 3 a). Dies führt zu Schwankungen der Auflösungen der Bilder. Folglich sind die aufgenommenen Pflanzen, sowohl im Annotationsprozess für den Menschen als auch für die KI zum Teil nicht zu detektieren. Außerdem ändert sich mit ungewollter Veränderung der GSD auch der aufgenommene Bildausschnitt und somit auch die Überlappung der einzelnen aufgenommenen Bilder. Eine Verringerung der GSD kann dann dazu führen, dass keine Überlappung zwischen den Einzelaufnahmen mehr vorhanden ist (Abbildung 3 a). Dies trat in 2024 gehäuft auf, sodass Bereiche eines Feldes nicht erfasst wurden, wodurch die Erstellung einer vollständigen Beikrautkarte nicht möglich war. Daher wurde für die Befliegungen im Folgejahr 2025 eine andere Flugplanungssoftware (UgCS) verwendet. Diese ermöglicht den Modus terrain follow auch bei niedrigeren Flughöhen und unterstützt den Import hochwertiger DGMs, die als Referenz zur Flughöhenanpassung verwendet werden. Das sorgt für reibungslose und präzise Nutzung des terrain follow, ermöglicht eine konstante GSD und einen gleichbleibenden Overlap in den Aufnahmen (Abbildung 3 b).

a) ohne Terrain Follow



b) mit Terrain Follow

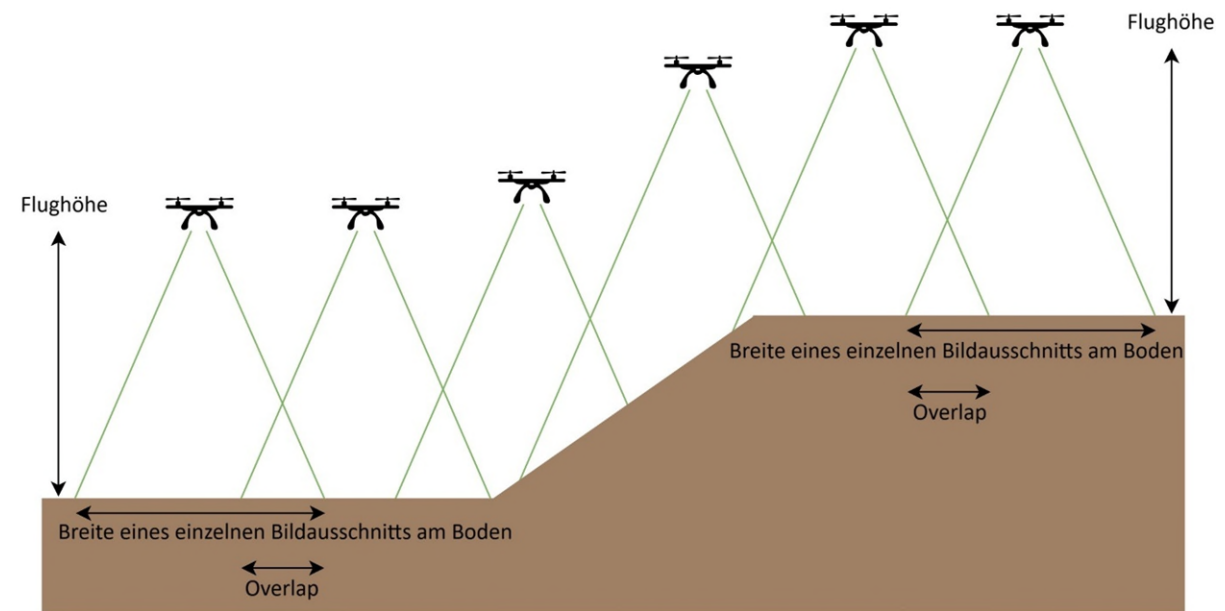


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Parameter Flughöhe, Overlap und Bildausschnittbreite bei Hangbefliegungen ohne terrain follow (a) und mit terrain follow (b).

Der zeitliche Aufwand von Drohnenaufnahmen ist nicht zu unterschätzen. Eine Befliegung mit der M300 mit Zenmuse P1 und 35 mm Objektiv, einer Fluggeschwindigkeit von 3 m/s, einer GSD von 0,30 cm/px und einer Überlappung von 75 % seitlich und frontal dauert durchschnittlich rund 10 min/ha. Dazu kommen Planungs-, Anfahrts- und Rüstzeiten. Dies ist für landwirtschaftliche Flächen nicht praktikabel. Die wichtigsten Stellschrauben für effizientere Aufnahmen sind Overlap, Flughöhe bzw. GSD und die Fluggeschwindigkeit. Dabei steht eine Verbesserung dieser Parameter zugunsten der Flugdauer häufig im Zielkonflikt mit der Qualität der Aufnahmen. Eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit steigert die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Bewegungsunschärfe. Eine

Vergrößerung der Flughöhe und damit eine Steigerung der GSD führt zu einer schlechteren Erkennbarkeit der Pflanzen. Die Verringerung des Overlaps hingegen führt nicht zu Verlusten in der Aufnahmequalität, sondern benötigt nur andere Methoden der Kartenerstellung anstatt des üblichen Orthofotos und ist deswegen als effizienzsteigernde Maßnahme zu bevorzugen. Im Projekt konnte der Overlap durch Nutzung des Tools Drone-Footprints daher auf bis zu 10 % seitlich und frontal reduziert werden. Bei gleicher Drohne, Fluggeschwindigkeit und GSD kann somit der Zeitaufwand von 10 min/ha auf 3 min/ha reduziert werden. Weitere Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern und der Flugzeit pro Hektar können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Flugdauer in Abhängigkeit von verschiedenen Drohnenparametern

GSD [cm/px]	Fluggeschwindigkeit [m/s]	Overlap frontal [%]	Overlap seitlich [%]	Drohne	Flugzeit pro Hektar [min/ha]
0,15	3	75	75	M3M	29
0,30	3	75	75	M3M	15
0,30	3	10	10	M3M	5
0,30	6	10	10	M3M	3
0,15	3	75	75	M300	19
0,30	3	75	75	M300	10
0,30	3	10	10	M300	3
0,30	6	10	10	M300	2

GSD und Fluggeschwindigkeit sind demzufolge hauptsächlich von der verwendeten Kamertechnik abhängig. Kameras mit größerem Sensor und höherer Auflösung ermöglichen bei gleicher GSD größere Flughöhen und damit höhere Flächenleistungen, während gleichzeitig kleinere Pflanzen besser abgebildet werden können. Darüber hinaus beeinflussen auch radiometrische Eigenschaften wie Dynamikumfang und Signal-Rausch-Verhältnis die Bildqualität, da in den für die Anwendung relevanten frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen häufig ein geringer Kontrast zwischen kleinen Pflanzen und dem überwiegend sichtbaren Boden besteht. Im Versuch erwies sich die M3M Kamera dabei als weniger praktikabel zur Erkennung kleiner Beikräuter als der Zenmuse P1 Sensor. Mit der Weiterentwicklung der Kamertechnologie ist daher zu erwarten, dass sowohl die Effizienz der Datenerhebung als auch die Detektion von Pflanzen im Keimblattstadium zukünftig weiter verbessert wird.

3.1.2 Maiserkennung

Es wurden verschiedene Modelle zur Maiserkennung trainiert, wobei der Fokus auf den Wachstumsstadien 12 – 13 lag. Die Ergebnisse am Testset von 639 Bildausschnitten sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: F1-Score berechnet auf 639 Bildausschnitten (Testset) von 15 verschiedenen Flächen

Modell	Precision			Recall			F1-Score		
	son-nig	be-wölkt	kom-plett	son-nig	be-wölkt	kom-plett	son-nig	be-wölkt	kom-plett
YOLO26-n	0.976	0.974	0.984	0.451	0.733	0.810	0.616	0.836	0.889
YOLO26-s	0.985	0.982	0.982	0.520	0.753	0.858	0.681	0.852	0.916
YOLO26-m	0.990	0.986	0.985	0.467	0.784	0.856	0.634	0.874	0.916
YOLO26-l	0.986	0.984	0.986	0.596	0.794	0.867	0.743	0.879	0.923
YOLO26-x	0.983	0.988	0.988	0.574	0.794	0.849	0.724	0.881	0.913
RTDETR-l	0.959	0.686	0.676	0.794	0.607	0.819	0.869	0.644	0.741
RTDETR-x	0.945	0.983	0.862	0.719	0.482	0.630	0.817	0.647	0.728

Anm.: Precision, Recall und F1-Score sind dimensionslose Gütemaße mit einem Wertebereich von 0 bis 1. Der F1-Score wird als harmonisches Mittel aus Precision und Recall berechnet und berücksichtigt damit sowohl die Genauigkeit der positiven Vorhersagen als auch die Vollständigkeit der Erkennung. Die Precision beschreibt dabei den Anteil der korrekt als positiv klassifizierten Objekte an allen als positiv vorhergesagten Objekten, während der Recall den Anteil der korrekt erkannten positiven Objekte an allen tatsächlich positiven Objekten angibt.

Tabelle 3 vergleicht die Leistung verschiedener Modellarchitekturen unter unterschiedlichen Lichtbedingungen und zeigt einen deutlichen Vorteil bei der Verwendung des kompletten Datensatzes. Dies wird dadurch sichtbar, dass Modelle, die auf der Kombination aus sonnigen und bewölkten Daten trainiert wurden, durchweg stabilere Ergebnisse liefern als Modelle, die lediglich auf isolierte Wetterbedingungen spezialisiert sind. Dies deutet auf einen positiven Transfer-Effekt durch die erhöhte Datenvarianz hin. Im direkten Vergleich der Architekturen erweist sich YOLO26-l als das leistungsfähigste Modell: Mit einem F1-Score von 0,923 im Gesamtdatensatz übertrifft es die nächstbeste Konfiguration um etwa 0,7 %. Während die Precision über fast alle YOLO-Varianten hinweg konstant hoch bleibt, ist der Recall besser bei der YOLO-l-Variante.

Zusätzlich wird deutlich, dass RTDETR-Modelle eine deutlich inkonsistentere Performance aufweisen. Insbesondere bei bewölkten Bedingungen und im kombinierten Datensatz sinken die Precision-Werte bei RTDETR-l und RTDETR-x teilweise drastisch ab. Ein Hauptgrund hierfür ist, dass diese Modelle während der Trainingsphase divergierten, also keine stabile Konvergenz der Fehlerfunktion erreichten, was zu unzuverlässigen Vorhersagen und einer schlechteren Balance zwischen Precision und Recall führte. Zusammenfassend lieferte YOLO26-l die besten Ergebnisse und wurde für alle weiteren Analysen ausgewählt.

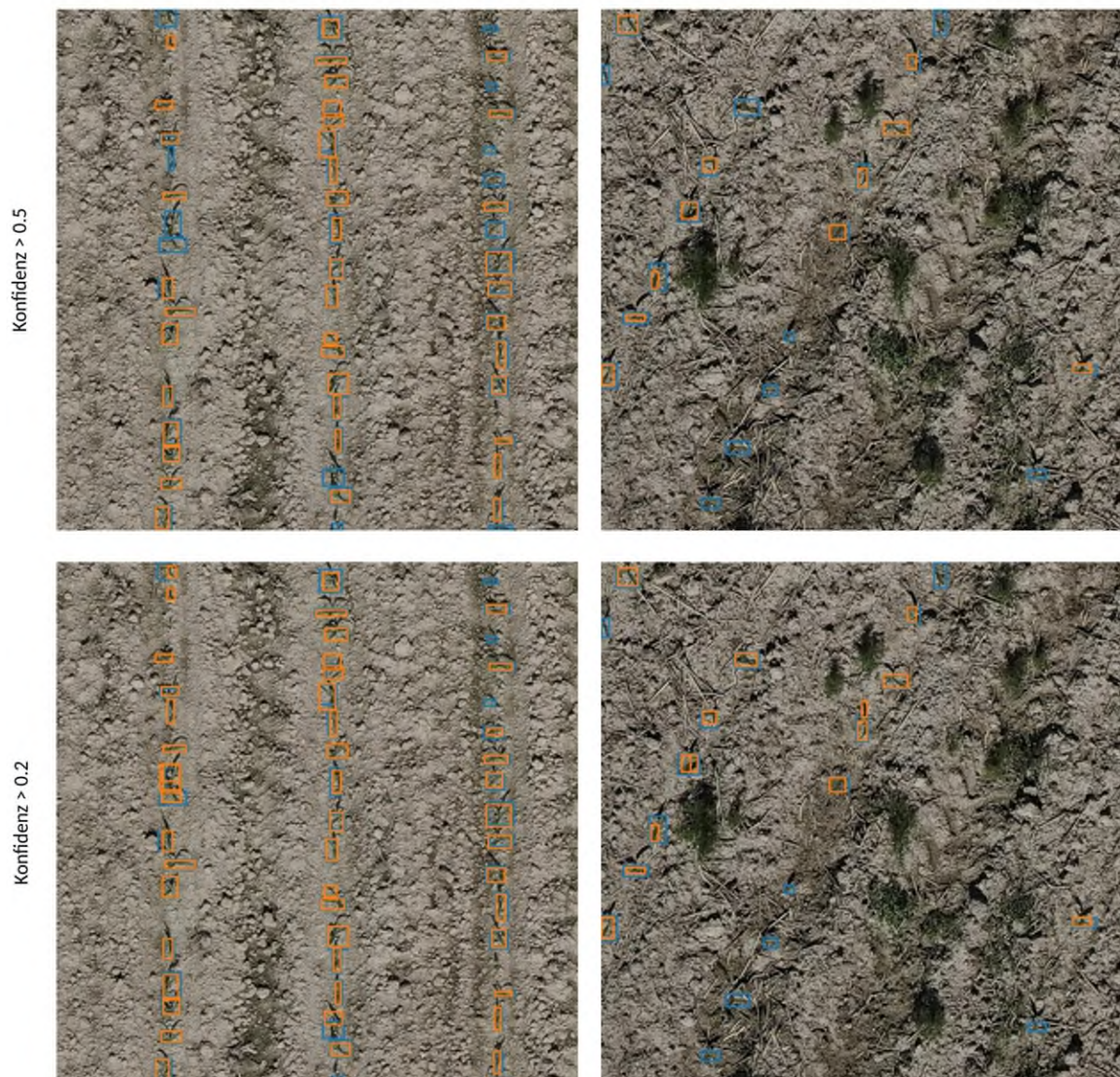


Abbildung 2: Beispiele für verschiedene Konfidenz-Werte. Grundwahrheit ist in blau dargestellt, Vorhersagen in orange. Man sieht, dass viele Maispflanzen durch ihren niedrigeren Konfidenz-Schwellenwert erkannt werden (links). Bei manchen Flächen können auch mit einer verringerten Konfidenz nicht ausreichend Maispflanzen erkannt werden (rechts).

Die Analyse der Detektionsraten verdeutlicht, dass ein zu hoch gewählter Konfidenzwert eine der primären Ursachen für nicht erkannte Maispflanzen darstellt, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Ein Standardwert von 0,5 ist für viele Maispflanzen zu strikt. Es zeigt sich jedoch, dass eine Herabsetzung dieser Schwelle auf 0,2 die Modellleistung positiv beeinflusst, ohne die Fehlerrate maßgeblich zu verschlechtern: Anstatt vermehrt Beikräuter fälschlicherweise als Mais zu klassifizieren, werden durch den niedrigeren Schwellenwert vor allem zusätzliche, tatsächliche Maispflanzen korrekt identifiziert. Interessanterweise handelt es sich dabei häufig um Pflanzen, die aufgrund schwieriger

Sichtverhältnisse oder Überlappungen ursprünglich nicht optimal annotiert worden sind. Dennoch muss festgehalten werden, dass das Modell auf vereinzelt Teilflächen an seine Grenzen stößt. In diesen spezifischen Arealen führen komplexe Feldbedingungen dazu, dass die Detektionsgüte trotz angepasster Parameter noch nicht das gewünschte Niveau erreicht.

3.1.3 Erstellung einer Applikationskarte

In einem weiteren Schritt wurden Maisdetektionen der einzelnen Bildausschnitte wieder zu einem kompletten Drohnenbild zusammengeführt. Zusätzlich wurden Detektionen von teilweise abgeschnittenen Maispflanzen an den Rändern benachbarter Bildausschnitte aggregiert. Dadurch wurden Mehrfachzählungen einer einzelnen Maispflanze unterbunden.

Anschließend wurden diese Detektionen aus der Vegetation jedes Drohnenbildes entfernt, um den Fokus rein auf die Beikräuter zu legen (siehe Abbildung 2). Die daraus resultierenden Beikrautkarten wurden anschließend georeferenziert und im Shapefile-Format exportiert. Da die ursprünglichen Shapefiles aus einer Vielzahl rechteckiger Polygone bestanden, wurden diese zur Reduktion der Datenmenge in einem 3 m × 3 m Raster aggregiert, das parallel zu den Saatzeilen ausgerichtet wurde. Abschließend wurde ein Schwellenwert für die Beikrautfläche angewendet, sodass nur die am stärksten befallenen Rasterzellen ausgewählt und für die weitere Bearbeitung gespeichert wurden. Es werden also die "Beikraut-Hotspots" markiert.

Aufgrund von GNSS-ungenauigkeiten in den Footprints der Drohnenbilder konnten die Karten zur Lokalisation der Beikraut-Hotspot verwendet werden, jedoch nicht zur kompletten Fahrspurplanung des Feldroboters.

3.1.4 Integration einer Beikrautkarte in die Feldrobotik

Das finale Ziel war die Untersuchung der technischen Umsetzbarkeit eines teilflächenspezifischen Verfahrens im autonomen mechanischen Pflanzenschutz, indem auf einer Testfläche ein vollständiger Workflow implementiert wurde. Dieser umfasste die Integration einer Beikrautkarte in das Spurplanungstool eines Feldroboters sowie das selektive Hacken von Beikrautnestern auf einem Feld. Für die Umsetzung dieses Workflows muss das Spurplanungsprogramm des Feldroboters über folgende Funktionen verfügen:

1. Schnittstelle zum Import externer Karten
2. Benutzerdefinierte Spurplanung (z. B. manuelles Abwählen einzelner Fahrspuren)
3. Möglichkeit zur Definition benutzerdefinierter Arbeitsbereiche innerhalb einer Fahrspur (z. B. Steuerung des Anhebens und Absenkens des Werkzeugs)

Tabelle 4: Funktionen ausgewählter Feldroboter (Stand 2025)

Robotername	Hersteller	Schnittstelle zum Import externer Karten	Benutzerdefinierte Spurplanung	Benutzerdefinierter Arbeitsbereich
Oz 440	Naïo	nein	ja	ja
FD20	Farmdroid	nein	ja	nein
Agbot 5.115t2	AgXeed	nein	nein	nein
Robotti 150D	Agrointelli	ja	ja	ja

Anm.: Die im Forschungsprojekt genannten Hersteller wurden als geeignete marktverfügbare Systeme verwendet und stehen somit exemplarisch für die jeweilige Drohnen- und Kamerakategorie. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Eine Überprüfung dieser Kriterien erfolgte für die dem Konsortium zur Verfügung stehenden Feldroboter Oz 440 (Naïo), FD20 (Farmdroid), Agbot 5.115t2 (AgXeed) und Robotti 150D (Agrointelli) (Tabelle 4). Die Analyse zeigt, dass der Oz 440, der FD20 und der Robotti 150D eine benutzerdefinierte Spurplanung unterstützten, wodurch die manuelle Auswahl oder Deaktivierung einzelner Fahrspuren innerhalb eingemessener Feldgrenzen möglich ist. Benutzerdefinierte Arbeitsbereiche lassen sich hingegen nur beim Oz 440 und beim Robotti 150D festlegen. Der Import externer Karten ist bei den betrachteten Robotersystemen meist nur eingeschränkt oder gar nicht möglich, was in der Regel auf sicherheitstechnische Vorgaben zurückzuführen ist. Eine Ausnahme stellt der Robotti 150D dar, der über eine Schnittstelle zum Import externer Karten im Shape-Format verfügt und sowohl benutzerdefinierte Arbeitsbereiche als auch eine benutzerdefinierte Spurplanung ermöglicht. Damit kann mit diesem System eine externe Beikrautkarte integriert werden. Auf Basis der Applikationskarten werden beim Robotti 150D sogenannte "Workzones", also Teilarbeitsbereiche innerhalb der festgelegten Feldgrenzen, definiert. Innerhalb dieser Workzones kann der Robotti 150D sein Arbeitswerkzeug absenken, während die übrige Feldfläche als Transferbereich mit angehobenem Werkzeug durchfahren wird. Die Fortbewegung erfolgt dabei weiterhin entlang zuvor definierter Fahrspuren. Zum Zeitpunkt der Untersuchung (2025) gab es nur wenige Feldroboter, die in der Lage waren, Applikationskarten zu nutzen. Häufige Updates und Funktionserweiterungen der Systeme könnten jedoch deren Nutzung in der Zukunft ermöglichen.

Aufgrund der für die technische Umsetzung der teilflächenspezifischen mechanischen Beikrautregulierung erforderlichen Funktionen wurde der Workflow mit dem Robotti 150D durchgeführt. Die Untersuchung wurde auf einer 0,15 ha großen Maisfläche in Pulling (Bayern) durchgeführt. Um das Risiko eines Spurversatzes, der beim Hacken kritischer sein kann als bei einer Herbizidapplikation, zu minimieren, wurde bereits die Aussaat mit dem Robotti 150D durchgeführt. Aufgrund eines starken Drahtwurmbefalls musste eine erneute, vergleichsweise späte Aussaat am

25.06.2025 erfolgen. Gesät wurde die Maissorte Geoxx Duo (RAGT) mit einem Reihenabstand von 50 cm.

Zur Erfassung des Beikrautauftommens wurde der Bestand am 07.07.2025 im Entwicklungsstadium BBCH 12 befliegen. Aus den mit einer Bodenauflösung von 0.30 cm/px aufgenommenen Bilddaten wurde mithilfe des im Projekt entwickelten KI-basierten Verfahrens eine Beikrautkarte erstellt. Diese bildete die Grundlage für die Ableitung der späteren Bearbeitungszonen. Für die praktische Umsetzung wurde die Beikrautkarte in ein 3 × 3 m großes Raster überführt, das parallel zu den Aussaatspuren des Robotti 150D angelegt wurde. Die Rastergröße orientierte sich an der 3 m Arbeitsbreite des eingesetzten Hackgeräts Chopstar 3-60 (Einböck). Da dieses Gerät über keine Teilbreiten- oder Einzelscharabschaltung verfügte, konnten als Bearbeitungsoptionen lediglich "Hackgerät abgesenkt" oder "Hackgerät ausgehoben" genutzt werden. Insgesamt wurde die Testfläche in 204 Rasterzellen zu je 9 m² unterteilt.

Das KI-Verfahren identifizierte auf der Fläche 1.786 Beikrautpolygone, welche die Blattmasse des Beikrauts repräsentierten. Anschließend wurde für jede Rasterzelle der Beikrautbedeckungsgrad berechnet, indem die Fläche der Beikrautpolygone ins Verhältnis zur Gesamtfläche der Zelle gesetzt wurde. Die ermittelten Werte lagen zwischen 0 % und 19,6 %. Für die Entscheidung, ob eine Zelle bearbeitet werden sollte, wurde ein exemplarischer Schwellenwert von 6,2 % Beikrautbedeckung festgelegt. Dieser diente ausschließlich der Demonstration des Workflows; eine Analyse optimaler Schwellenwerte oder deren agronomischer Auswirkungen war nicht Gegenstand der Studie. Die auf dieser Grundlage erstellte Applikationskarte wurde als Shapefile in die Planungsplattform von Agointelli 150D importiert und dort mit dem bestehenden Fahrspurplan verknüpft. Der Robotti 150D führte die mechanische Beikrautregulierung anschließend autonom aus, indem er das Hackgerät nur in den zuvor definierten Teilflächen absenkte und außerhalb dieser Bereiche angehoben ließ. Im Ergebnis wurden 0,08 ha, also 53 % der Gesamtfläche, gezielt bearbeitet.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die teilflächenspezifische mechanische Beikrautregulierung auf Basis KI-generierter Beikrautkarten technisch grundsätzlich realisierbar ist. Gleichzeitig wird deutlich, dass der Workflow derzeit noch mehrere manuelle Zwischenschritte erfordert und damit noch nicht praxistauglich ist. Potenzielle Vorteile hinsichtlich Erosionsminderung, Arbeitszeit und Energieverbrauch hängen zudem stark von der Anzahl und räumlichen Verteilung der zu bearbeitenden Teilflächen ab.

3.2 Bewertungsstufe 2: Ökonomische Bewertung

In der zweiten Bewertungsstufe werden auf Basis von Beikrautkarten eines externen Dienstleisters, in denen die einzelnen Beikräuter quantifiziert und nach Monokotylen und Dikotylen unterschieden sind, die ökonomischen Effekte der teilflächenspezifischen Verfahren untersucht.

3.2.1 Teilflächenspezifische Herbizidapplikation

Die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit teilflächenspezifischer Herbizidverfahren zeigen für die 19 analysierten konventionell bewirtschafteten Felder ein moderates bis hohes Herbizideinsparpotenzial (Abbildung 5). Werden die drei Entscheidungsstrategien auf die Felder angewendet, ergibt sich für die drei untersuchten Rasterauflösungen (25 cm × 25 cm, 50 cm × 50 cm und 1 m × 1 m) bei der Strategie des "ökonomischen Schwellenwerts" mit durchschnittlich 66 % das höchste Einsparpotenzial. Die Entscheidungsstrategien "Nulltoleranz" und "Dual-Dosis-Strategie" weisen mit Einsparungen von im Mittel 44 % bzw. 22 % ein vergleichsweise geringeres Herbizideinsparpotenzial auf. Bei den Strategien "Nulltoleranz" und "Dual-Dosis-Strategie" hat die gewählte Rasterauflösung (25 cm × 25 cm, 50 cm × 50 cm und 1 m × 1 m) einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Höhe der Herbizideinsparungen ($p < 0,05$), während für die Strategie des "ökonomischen Schwellenwerts" kein signifikanter Einfluss der Rastergröße nachgewiesen werden konnte.

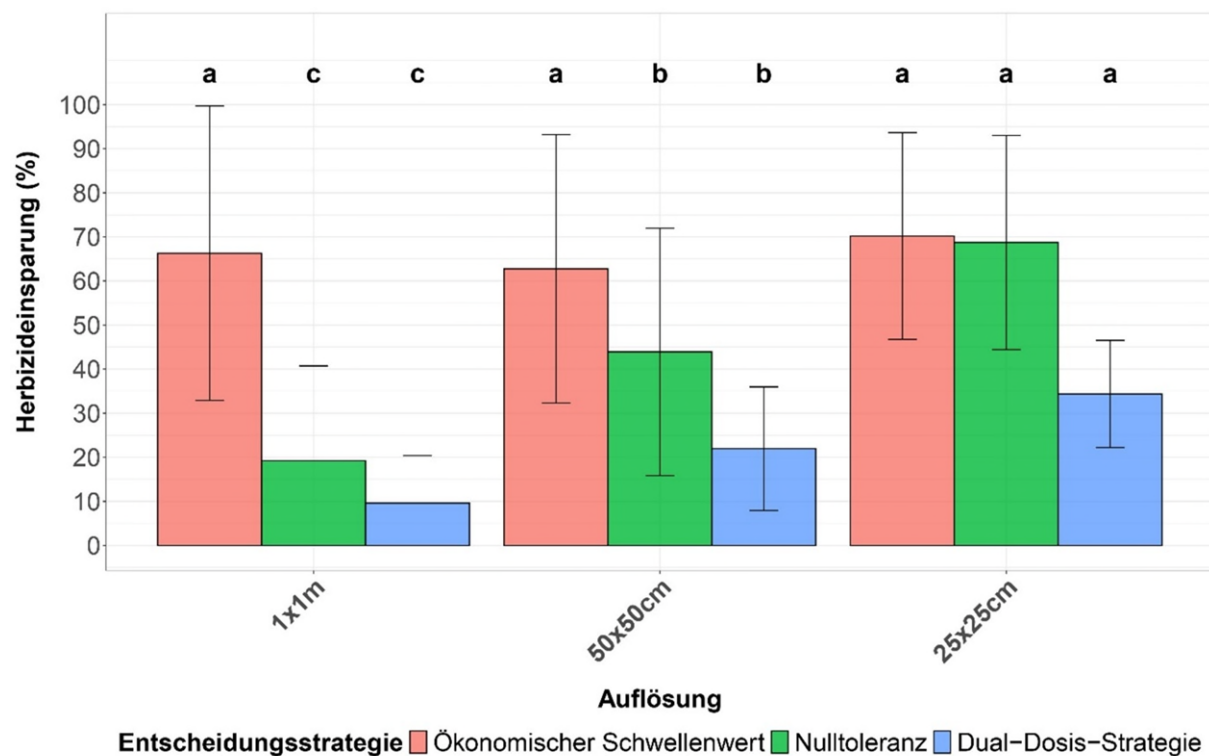


Abbildung 3 Reduzierung des Herbizideinsatzes (%) bei teilflächenspezifischer im Vergleich zur ganzflächigen Herbizidapplikation für drei analysierte Entscheidungsstrategien und Rastergrößen

Anm.: Ergebnisse beziehen sich auf 19 analysierte konventionelle Felder, Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante ($p < 0,05$) Mittelwertsunterschiede

Die Höhe des Gewinnbeitrags hängt bei den 19 betrachteten Feldern maßgeblich vom zugrunde liegenden Technologiekostenszenario ab (Abbildung 6). Für das Basisszenario (Szenario 1) ergibt sich ein durchschnittlicher Gewinnbeitrag von -4 €/ha, während in Szenario 2 ein Wert von +18 €/ha erreicht wird. Niedrigere durchschnittliche Gewinnbeiträge zeigen sich in den Szenarien 3 bis 5 mit -88 €/ha in Szenario 3, -3 €/ha in Szenario 4 sowie -105 €/ha in Szenario 5. In den Szenarien 3 und 5 wurden über alle betrachteten Varianten ausschließlich negative durchschnittliche Gewinnbeiträge ermittelt (nicht dargestellt). Für die Entscheidungsstrategie der "Dual-Dosis-Strategie" wurde mit -56 €/ha der niedrigste mittlere Gewinnbeitrag festgestellt, gefolgt von der "Nulltoleranz-Strategie" mit -28 €/ha und der Strategie "ökonomischer Schwellenwert" mit -25 €/ha. Betrachtet man die drei untersuchten Rasterauflösungen (25 cm × 25 cm, 50 cm × 50 cm und 1 m × 1 m), zeigt sich, dass der mittlere Gewinnbeitrag mit abnehmender Rasterzellgröße tendenziell steigt. In nahezu allen Fällen ist der mittlere Gewinnbeitrag bei einer Rasterzellengröße von 25 cm × 25 cm statistisch signifikant höher als bei einem 1 m × 1 m Raster. Die Ergebnisse verdeutlichen damit die Vorteile einer feineren räumlichen Auflösung der Applikationstechnik im Vergleich zu größeren Teilbreiten. In den Kostenszenarien 1 und 4 wird bei 25 cm × 25 cm Rasterauflösung erstmals ein deutlich positiver Gewinnbeitrag erzielt. Trotzdem bleibt der Gewinnbeitrag selbst beim 25 cm × 25 cm Raster in den Szenarien 3 und 5 mit hohen Technologiekosten (herstellerfremdes Nachrüstset bzw. eigene Drohne sowie Erstellung der Beikrautkarten als Dienstleistung) negativ. Aus den Ergebnissen lässt sich daher ableiten, dass niedrige Verfahrenskosten der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation sowie eine möglichst feine räumliche Auflösung der Applikationstechnik zentrale Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens darstellen (Abbildung 6).

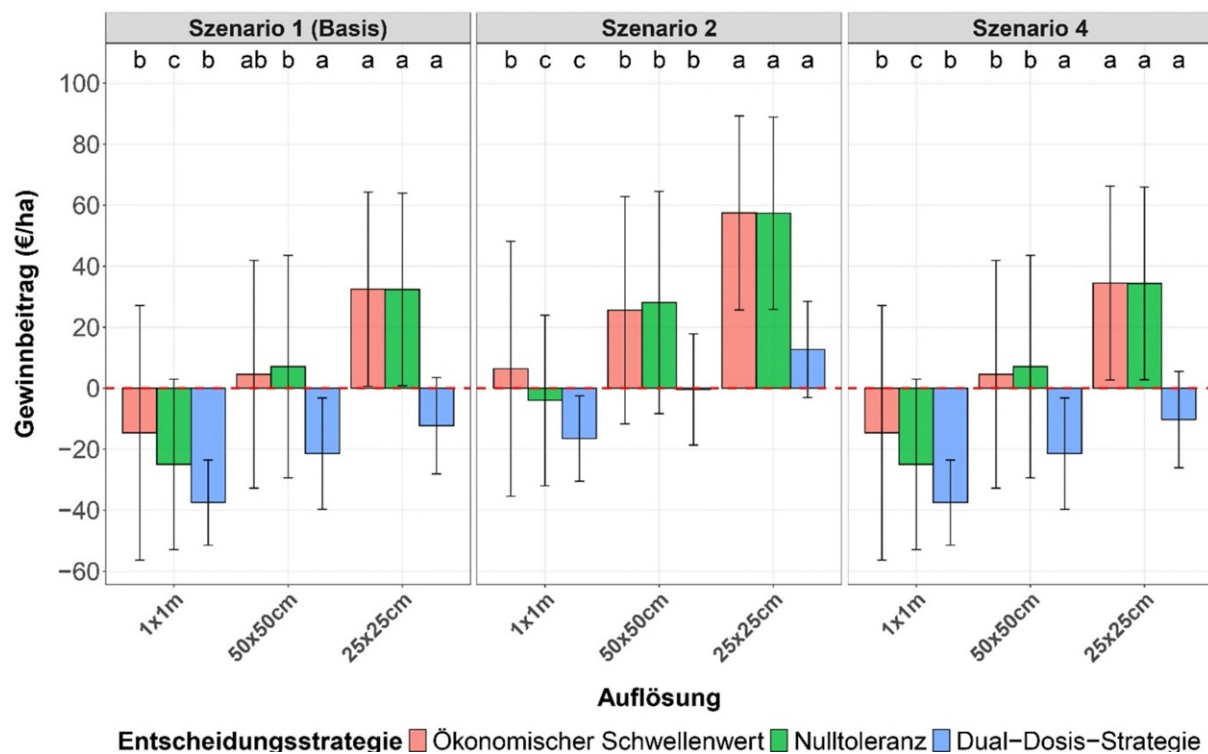


Abbildung 4: Gewinnbeitrag [€/ha] der teilflächenspezifischen im Vergleich zur ganzflächigen Herbizidapplikation für drei analysierte Entscheidungsstrategien und Rastergrößen

Anm.: Ergebnisse beziehen sich auf 19 analysierte konventionelle Felder, Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante ($p < 0,05$) Mittelwertsunterschiede

Weitergehend wurden die Break-Even-Punkte berechnet, um zu bestimmen, wie hoch die zusätzlichen Kosten für ein teilflächenspezifisches Verfahren (Applikationstechnik, Drohnenbefliegung und Erstellung der Beikrautkarte) maximal sein dürfen, damit die Gewinnschwelle erreicht wird. Die Break-Even-Punkte liegen für die 19 analysierten Felder bei den betrachteten Varianten zwischen -3 € und +66 €. Für die Entscheidungsstrategien "ökonomischer Schwellenwert" und "Nulltoleranz" bewegen sich die Werte in einem vergleichbaren Bereich, während sie für die "Dual-Dosis-Strategie" insgesamt niedriger ausfallen. Lediglich in der Kombination der "Dual-Dosis-Strategie" mit einer Rasterauflösung von 1 m × 1 m liegt der Break-Even-Punkt mit -3 € im negativen Bereich.

Die Kosten für eine Drohnenbefliegung und die Erstellung einer Beikrautkarte können eine große Spannweite aufweisen. So sieht die Preisgestaltung mancher Dienstleister für die Erstellung von Beikrautkarten beispielsweise einen Festpreis je Feld (unabhängig von der Flächengröße) vor, was bei kleinstrukturierten Flächenverhältnissen, wie sie etwa in Bayern auftreten, zu vergleichsweise hohen Kosten je Beikrautkarte führen kann. Andere Dienstleister bieten die Drohnenbefliegung als Komplettdienstleistung an, wobei insbesondere Anfahrtkosten zum Betrieb einen relevanten Kostenfaktor darstellen können. Auch die eigenständige Durchführung einer Drohnenbefliegung nach Anschaffung einer eigenen Drohne kann zeit- und damit kostenintensiv sein. Mit dem technischen Fortschritt kann die Effizienz der Drohnenbefliegung jedoch steigen und somit zukünftig zu einer wesentlichen Reduktion der Verfahrenskosten beitragen.

Bei der Entscheidungsstrategie "ökonomischer Schwellenwert" kann der Trend einer höheren Herbizideinsparung mit kleiner werdender Rasterzellengröße (entspricht höherer Auflösung) nicht beobachtet werden, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass das verwendete Modell mit der zugrunde liegenden Datenbasis für ein $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ Raster optimiert wurde. Die Anwendung dieses ökonomischen Schwellenwertmodells ohne Berücksichtigung der räumlichen Autokorrelation kann die Auswirkungen des Beikrautdrucks auf den Ertragsverlust benachbarter Zellen vernachlässigen und somit den Ertragsverlust unterschätzen. Die explizite Modellierung der räumlichen Autokorrelation hätte eine deutlich umfangreichere Modellparametrisierung erfordert und ging daher über den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit hinaus. Darüber hinaus hängen die Ergebnisse für das $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ Raster von vereinfachenden Annahmen ab, die sich aus der aktuellen Technologie- und Datenverfügbarkeit ergeben, darunter eine binäre Beikrautklassifizierung (und damit binäre Konkurrenzindizes, die von Experten geschätzt wurden) oder Ertragsverlustparameter, die aus älterer Literatur übernommen wurden, da neuere Forschungsergebnisse nicht vorliegen. Daher sollten die Ergebnisse für alle Rasterzellengrößen unter Berücksichtigung der Modellspezifikation mit Vorsicht interpretiert werden.

Die Entscheidungsstrategie "ökonomischer Schwellenwert" zeigt zwar im Durchschnitt den höchsten Gewinnbeitrag, ist jedoch gleichzeitig mit einem erhöhten agronomischen Risiko verbunden, das sich in einer möglichen Ausbreitung nicht bekämpfter Beikräuter sowie potenziell höheren Bekämpfungskosten in den Folgejahren äußern kann (Schattenkosten), die hier nicht berücksichtigt sind. In extremen Fällen kann dies dazu führen, dass profitable Kulturen zugunsten weniger profitabler Kulturen aus der Fruchtfolge verdrängt werden, was zu hohen Opportunitätskosten führen kann. Eine Berücksichtigung von Schattenkosten oder die Modellierung der Dynamik der Beikrautpopulation stellen geeignete Ansätze dar, um dieses Problem in der Simulation abzubilden. Diese Ansätze erfordern jedoch eine robuste Parametrisierung sowie eine empirische Validierung, die über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgehen, auch da die verfügbare empirische Datenbasis hierzu derzeit begrenzt ist.

Zu den auf der Basis von 19 Feldern ermittelten Ergebnissen zur teilflächenspezifischen Herbizidapplikation lässt sich festhalten, dass das durchschnittlich moderate bis hohe Herbizideinsparpotenzial durch die hohen Verfahrenskosten für die Applikationstechnik und die Erstellung der Beikrautkarte oft weitgehend kompensiert wird. Weiterhin zeigt sich, dass eine hohe räumliche Auflösung der Applikationstechnik sowie niedrige Kosten für die Applikationstechnik und die Erstellung der Beikrautkarte zentrale Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Einsatz teilflächenspezifischer Herbizidverfahren sind.

3.2.2 Teilflächenspezifische mechanische Beikrautregulierung

Die Auswertungen der zwölf Beikrautkarten von acht biologisch bewirtschafteten Feldern zeigen, dass der angenommene Schwellenwert für die Beikrautdichte nur für die Schadschwelle von 45 Beikräutern je Rasterzelle (~ 5 Beikräuter/ m^2) vor dem ersten Hackvorgang einen statistisch signifikanten Einfluss auf die aktive (zu bearbeitende) Arbeitsfläche ausübt (Abbildung 7). Für die betrachteten Felder beträgt die aktive Arbeitsfläche bei Annahme der Schwellenwerte von ≥ 5 Beikräutern je Rasterzelle ($\sim 0,5$ Beikräuter/ m^2) und ≥ 10 Beikräutern je Rasterzelle ($\sim 1,1$ Beikräuter/ m^2) jeweils nahezu 100 %. Bei höheren Schwellenwerten von ≥ 27 Beikräutern je Rasterzelle (~ 3 Beikräuter/ m^2) und ≥ 45 Beikräutern je Rasterzelle (~ 5 Beikräuter/ m^2) verringert sich die aktive Arbeitsfläche vor der ersten Anwendung ($n = 7$) um durchschnittlich 5 % bzw. 10 % und vor der zweiten Anwendung ($n = 5$) um durchschnittlich 3 % bzw. 5 %.

Die maximale Reduzierung der aktiven Arbeitsfläche, die bei einem der untersuchten Felder auftrat, beträgt 66 %. Die Analyse aller zwölf Beikrautkarten der acht Felder zeigt jedoch, dass selbst beim höchsten betrachteten Schwellenwert der Beikrautdichte von ≥ 45 Beikräutern je Rasterzelle (~ 5 Beikräuter/ m^2) weiterhin alle Fahrspuren befahren werden müssen, wodurch potenzielle Einsparungen an Arbeitszeit und Energieverbrauch deutlich eingeschränkt bleiben.

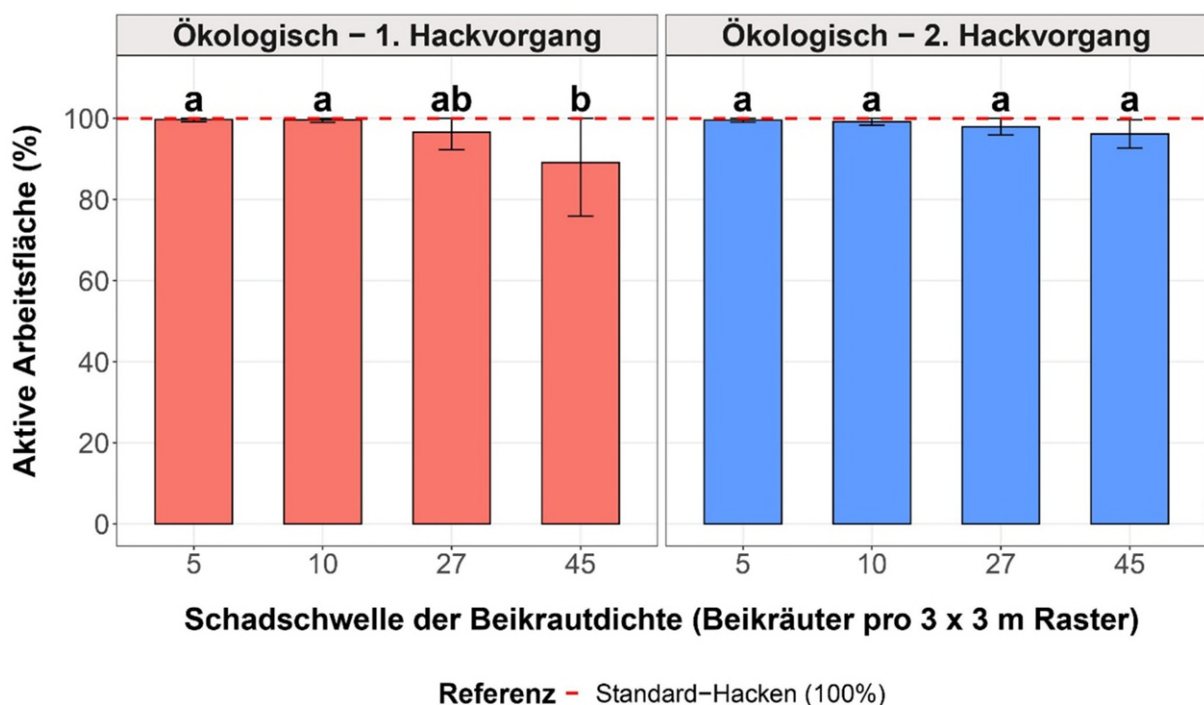


Abbildung 5: Aktive Arbeitsfläche (%) in Abhängigkeit verschiedener Schadschwellen der Beikrautdichte

Anm.: Ergebnisse beziehen sich auf acht analysierte ökologische Felder (insgesamt 7 Beikrautkarten des ersten und 5 Beikrautkarten des zweiten Hackvorgangs), Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante ($p < 0,05$) Mittelwertsunterschiede

Die Berechnungen potenzieller Deseinsparungen durch ein angehobenes Hackgerät auf den nicht aktiven Arbeitsflächen beim teilflächenspezifischen mechanischen Beikrautmanagement zeigen für die zwölf analysierten Beikrautkarten kein ökonomisches Potenzial. Ökonomisch beziffert sich das Einsparpotenzial beim Dieselverbrauch bei den zwölf betrachteten Beikrautkarten auf durchschnittlich 0 €/ha bzw. 0 €/Feld. Im günstigsten Fall (Schwellenwert für die Beikrautdichte ≥ 45 Beikräuter je Rasterzelle ($\sim 5,0$ Beikräuter/m²), Feldgröße: 8,3 ha, 15 % nicht-aktive Arbeitsfläche) konnte eine Einsparung von rund 5 €/Feld erreicht werden. Berücksichtigt man die Informationskosten in dieser ökonomischen Bewertung und geht vom günstigsten Fall von 15 €/ha für den Erwerb einer Beikrautkarte aus, ergibt sich ein durchschnittlicher Wert von -15 €/ha bzw. -71 €/Feld. Schon durch die Berücksichtigung der Informationskosten zeigt sich, dass selbst beim höchsten untersuchten Schwellenwert für die Beikrautdichte ein negativer Gewinnbeitrag entsteht. Zusätzliche Faktoren, wie Schattenkosten oder potenzielle Ertragsverluste durch auf dem Feld verbleibendes Beikraut, würden das ökonomische Ergebnis weiter verschlechtern. Dass das ermittelte Potenzial zur Reduzierung der aktiven Arbeitsfläche und die daraus resultierenden ökonomischen Effekte durch Einsparungen beim Dieselverbrauch begrenzt bzw. nicht vorhanden sind, kann unter anderem auf die vergleichsweise große Rasterzellengröße von 3 m $\times$ 3 m zurückzuführen sein. Dadurch könnte auch das ökonomische Potenzial im Vergleich zu den betrachteten konventionellen Feldern mit teilflächenspezifischer Herbizidapplikation begrenzt sein. Entwicklungen am Markt zeigen, dass auch Section-Control-Funktionen bei Hackgeräten verfügbar sind; dabei würden Deseinsparungen jedoch eine geringere Rolle spielen. Neben den ökonomischen Auswirkungen ist ein möglicher ökologischer Vorteil in Form einer Reduzierung des Erosionsrisikos zu nennen, für dessen Quantifizierung durch Hacken bzw. Nicht-Hacken bislang kaum Literatur verfügbar ist.

3.2.3 Limitationen der Beikrautkartierung als Entscheidungsgrundlage

Sowohl bei den betrachteten Szenarien der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation als auch der teilflächenspezifischen mechanischen Beikrautbekämpfung bildet die verfügbare Beikrautkarte die Grundlage dafür, in welchen Teilflächen (Rasterzellen) eine Bekämpfung des Beikrauts erfolgen soll. Dabei ist maßgeblich, inwieweit diese Beikrautkarte die tatsächlich auf dem Feld vorhandene Beikrautpopulation präzise abbildet. Eine Erprobung marktverfügbarer Beikrautkarten durch die Autoren im Jahr 2025 lieferte erste Hinweise darauf, dass insbesondere kleinere Beikräuter auf Drohnenaufnahmen teilweise selbst mit bloßem Auge nicht mehr zuverlässig erkannt werden können. Außerdem zeigte sich, dass sich marktverfügbare Beikrautkarten hinsichtlich ihrer Erkennungsleistung wesentlich unterscheiden können. Daher ist bei der Anwendung teilflächenspezifischer Beikrautbekämpfungsmaßnahmen (konventionell oder ökologisch) zu berücksichtigen, dass die

zugrunde liegende Beikrautkarte das tatsächliche Beikrautvorkommen nicht zwingend vollständig realitätsgetreu abbildet.

Eine weitere Herausforderung ist, dass marktverfügbare Beikrautkarten zwar Angaben über die Anzahl vorhandener Beikräuter und auch deren Kategorisierung in monokotyle und dikotyle Arten vornehmen, jedoch keine detaillierte Bestimmung der Beikrautarten erfolgt. Ausnahmen bilden deutlich abgrenzbare Beikräuter wie beispielsweise Disteln. Da Schadschwellen, Konkurrenzkraft sowie Bekämpfungsstrategien artabhängig variieren, kann die fehlende Information zur Artenzusammensetzung die optimale Wahl von Behandlungsflächen und Schwellenwerten beeinflussen. Die Behandlungsentscheidung erfolgt somit unter unvollständiger Information hinsichtlich der Artenzusammensetzung.

4 Fazit

Die Umsetzung drohnenbasierter Datenerhebung für den teilflächenspezifischen Pflanzenschutz stellt sich in der Praxis als anspruchsvoll dar. Voraussetzung sind hohe Bildauflösungen sowie der Einsatz eines terrain follow Modus, um eine konstante Datenqualität sicherzustellen. Die dafür erforderlichen niedrigen Flughöhen und hohen Bildüberlappungen führen jedoch zu einem erheblichen Zeitaufwand bei der Befliegung, was für landwirtschaftliche Betriebe eine wesentliche Einschränkung darstellt. Technologische Fortschritte in der Drohnen- undameratechnik sowie angepasste Methoden der Kartenerstellung können künftig zur effizienteren Datenerhebung beitragen. Alternativ können Landwirtinnen und Landwirte auf spezialisierte Dienstleister zurückgreifen, die sowohl Drohnenbefliegung als auch Kartenerstellung übernehmen.

Grundsätzlich ist eine teilflächenspezifische, mechanische Beikrautregulierung auf Basis hochauflösender Drohnendaten und moderner Deep-Learning-Algorithmen technisch realisierbar. Eine selektive Beikrautererkennung mittels KI-basierter Maiserkennung wurde erfolgreich umgesetzt. Die Maispflanzen wurden präzise identifiziert und anschließend aus der Gesamtvegetation entfernt, um Beikrautherde zu erhalten. Eine präzise Lokalisierung der Beikräuter bleibt jedoch eine zentrale Herausforderung, da die Berechnung der GNSS-Positionen aus Einzelaufnahmen von Drohnen systembedingte Ungenauigkeiten aufweist.

Der Workflow zur teilflächenspezifischen mechanischen Beikrautregulierung zeigt, dass das autonome Trägerfahrzeug Robotti 150D Beikrautkarten als Layer integrieren und Teilflächen gezielt nach definierten Schwellenwerten bearbeiten kann – eine Möglichkeit, die bei den anderen geprüften Robotersystemen fehlt. Dies ermöglicht eine selektive Bearbeitung einzelner Teilflächen, was den Ressourceneinsatz effizienter gestalten kann. Aufgrund mehrerer noch erforderlicher Zwischenschritte ist der Workflow jedoch gegenwärtig noch nicht praxistauglich.

Die ökonomische Bewertung zeigt, dass teilflächenspezifische Herbizidapplikation bei niedrigen Verfahrenskosten und feiner Rasterauflösung potenziell Herbizideinsparungen und moderate Gewinnbeiträge ermöglicht, während hohe Verfahrenskosten diese Vorteile häufig kompensieren. Im Vergleich dazu bietet die teilflächenspezifische mechanische Beikrautregulierung unter den untersuchten Bedingungen nur ein geringes ökonomisches Einsparpotenzial, was unter anderem auf die vergleichsweise große Rasterzellengröße zurückgeführt werden kann. Insgesamt hängt der Erfolg teilflächenspezifischer Maßnahmen maßgeblich von der Qualität der Beikrautkartierung, der gewählten Rastergröße und den Verfahrenskosten ab, während Unsicherheiten in der Kartengenauigkeit und fehlende Arteninformationen zusätzliche Limitationen darstellen.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Adoption von Verfahren des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes in klein- bis mittelstrukturierten Regionen Süddeutschlands nicht primär durch die Rentabilität der Verfahren getrieben werden wird, sondern vielmehr durch Investitionszyklen in neue Feldspritzen, welche bereits über Funktionen für teilflächenspezifische Applikationen verfügen. Darüber hinaus kann auch der gesellschaftspolitische Druck eine wichtige Rolle für die Implementierung spielen. Welche Verfahren – drohnenbasierte Offline-Systeme oder Online-Systeme – sich in den kommenden Jahren durchsetzen, wird wesentlich durch die technologische Leistungsfähigkeit und Umsetzungskompetenz der Anbieter geprägt.

Zusammenfassung

Entwicklung von Beikraut-Applikationskarten für den teilflächenspezifischen Pflanzenschutz

Technische Umsetzung und Ökonomische Bewertung

Pflanzenschutz steht vor der Herausforderung chemisch-synthetische Mittel zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund untersucht die Arbeit die Entwicklung drohnenbasierter Beikraut-Applikationskarten für teilflächenspezifische Beikrautregulierung, einschließlich ihrer Integration in Feldroboter zur mechanischen Regulierung, sowie die ökonomische Bewertung des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes. Die Ergebnisse zeigen, dass KI-basierte Beikrautkarten aus Drohnenbildern generiert und prinzipiell für eine selektive mechanische Regulierung durch Feldroboter genutzt werden können, ihre Genauigkeit jedoch bei kleinen Pflanzen und komplexen Feldbedingungen begrenzt ist und die robotische Nutzung durch fehlende Schnittstellen eingeschränkt wird. Ökonomisch weist teilflächenspezifischer chemisch-synthetischer Pflanzenschutz auf den analysierten Feldern in Bayern ein moderates bis hohes Potenzial zur Reduktion des Herbizideinsatzes auf, die resultierenden Gewinnbeiträge bleiben unter derzeitigen Kosten- und Technologierahmenbedingungen jedoch häufig gering oder negativ. Für teilflächenspezifische mechanische Verfahren zeigt sich auf den analysierten Feldern unter den betrachteten Rahmenbedingungen lediglich ein geringes Einsparpotenzial

hinsichtlich Energie- und Arbeitszeitaufwand; unter Berücksichtigung der Informationskosten ergeben sich folglich negative Gewinnbeiträge. Insgesamt bestätigt die Studie die technische Realisierbarkeit drohnen- und KI-basierter teilflächenspezifischer Beikrautregulierung, macht jedoch deutlich, dass ihre ökonomische Tragfähigkeit derzeit durch hohe Verfahrens- und Informationskosten, begrenzte räumliche Auflösung und Unsicherheiten bei der Beikrautkartierung und der Maschinenanwendung begrenzt ist.

Summary

Development of weed application maps for site-specific crop protection

Technical implementation and economic assessment

This study investigates the development of drone-derived weed application maps for site-specific weed management, their integration with field robots for mechanical weed control, and the economic performance of site-specific crop protection strategies. The findings indicate that AI-based weed maps can be derived from drone imagery and used to facilitate selective mechanical weed control by field robots. However, mapping accuracy declines for small plants and under complex field conditions, and practical implementation is currently limited by the lack of compatible interfaces. From an economic perspective, site-specific chemical crop protection on the analyzed fields in Bavaria shows moderate to high potential to reduce herbicide use, but under current technological and financial conditions the resulting benefits are often small or negative. On the analyzed fields, site-specific mechanical approaches exhibit only limited potential for savings in energy and labor requirements; consequently, negative net returns arise when information costs are included. Overall, the study demonstrates the technical feasibility of drone- and AI-based site-specific weed management, but its economic viability is currently constrained by high operational and information costs, limited spatial resolution, and uncertainties in weed mapping and machine application.

Literatur

- ALBASEER, S.S., V.L.B. JASPERS, L. ORSINI, P. VLAHOS, H.E. AL-HAZMI und H. HOLLERT, 2025. Beyond the field: How pesticide drift endangers biodiversity. *Environmental pollution*, 366, S. 125526. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.125526
- AMARI, S., 1993. Backpropagation and stochastic gradient descent method. *Neurocomputing*, 5(4-5), S. 185-196. DOI: 10.1016/0925-2312(93)90006-O
- BAMAL, D., A. DUHAN, A. PAL, R.K. BENIWAL, P. KUMAWAT, S. DHANDA, A. GOYAT, V.S. HOODA und R. YADAV, 2024. Herbicide risks to non-target species and the environment: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(6), S. 2977-3032. DOI: 10.1007/s10311-024-01773-9
- BARMAN, K.K., V.P. SINGH, R.P. DUBEY, P.K. SINGH, A. DIXIT und A.R. SHARMA, 2014. Challenges and opportunities in weed management under a changing agricultural scenario. In: B.S. CHAUHAN und G.

- MAHAJAN, Hg. *Recent advances in weed management*. New York, NY, USA: Springer New York, S. 365-390. DOI: 10.1007/978-1-4939-1019-9.
- CHANEY, K., D.R. HODGSON und M.A. BRAIM, 1985. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil physical properties in a long-term experiment on spring barley. *The Journal of Agricultural Science*, 104(1), S. 125-133. DOI: 10.1017/S0021859600043069
- COBLE, H.D., R.E. FRISBIE und P.L. ADKISSON, 1986. Development and implementation of economic thresholds for soybean. *CIPM: Integrated Pest Management on Major Agricultural Systems*, College Station, TX: Texas A&M University, 295-307.
- COUSENS, R., 1985. A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology*, 107(2), S. 239-252. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1985.tb01567.x
- DADBOUD, F., V. PATEL, V. MEHTA, M. BOLIC und I. MANTEGH, 2021. Single-Stage UAV detection and classification with YOLOV5: mosaic data augmentation and PANet. In: *2021 17th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, S. 1-8.
- EUROPÄISCHE UNION, 2020. *Farm to Fork Strategy* [Zugriff am: 13. März 2026]. Verfügbar unter: https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- GABRIEL, A. und M. GANDORFER, 2023. Adoption of digital technologies in agriculture — an inventory in a european small-scale farming region. *Precision Agriculture*, 24(1), S. 68-91. DOI: 10.1007/s11119-022-09931-1
- GERHARDS, R., D. ANDÚJAR SANCHEZ, P. HAMOUZ, G.G. PETEINATOS, S. CHRISTENSEN und C. FERNANDEZ-QUINTANILLA, 2022. Advances in site-specific weed management in agriculture—A review. *Weed Research*, 62(2), S. 123-133. DOI: 10.1111/wre.12526
- GIRSHICK, R., 2015. Fast R-CNN. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, S. 1440-1448.
- GUMMERT, A., E. LADEWIG und B. MÄRLÄNDER, 2012. Guidelines for integrated pest management in sugar beet cultivation: aspects of weed control. *Journal für Kulturpflanzen*, 64(4), S. 105-111. DOI: 10.5073/JfK.2012.04.01
- HOSANG, J., R. BENENSON und B. SCHIELE, 2017. Learning non-maximum suppression. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, S. 4507-4515.
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V., 2026. Dieselbedarfsrechner [Zugriff am: 13. März 2026]. Verfügbar unter: <https://daten.ktbl.de/dieselbedarf/>
- LIU, J., J. SU, X. YAO, Z. JIANG, G. LAI, Y. DU, Y. QIN, W. XU, E. LU, J. YAN, Y. CHEN, H. ZHENG, Y. LIU, S. LIU, B. YIN, W. HE, H. ZHU, Y. WANG, J. WANG, M. DONG, Z. ZHANG, Y. KANG, H. ZHANG, X. XU, Y. ZHANG, Y. WU, X. ZHOU und Z. YANG, 2025. Muon is scalable for LLM training. *arXiv preprint*. DOI: 10.48550/arXiv.2502.16982
- LIU, W., D. ANGUELOV, D. ERHAN, C. SZEGEDY, S. REED, C.-Y. FU und A.C. BERG, 2016. SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: B. LEIBE, J. MATAS, N. SEBE und M. WELLING, Hg. *Computer Vision – ECCV 2016*. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 21-37.
- MAUSER, K.M., C.A. BRÜHL und J.G. ZALLER, 2024. Herbicide effects on nontarget organisms, biodiversity and ecosystem functions. In: S.M. SCHEINER, Hg. *Encyclopedia of Biodiversity*. Third Edition. Oxford, UK: Academic Press, S. 239-257.
- MOHLER, C.L., M. LIEBMAN und C.P. STAVES, 2001. Mechanical management of weeds. In: M. LIEBMAN, C.L. MOHLER und C.P. STAVES, Hg. *Ecological management of agricultural weeds*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, S. 139-209.
- NEARING, M.A. und J.M. BRADFORD, 1985. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49(3), S. 547-552. DOI: 10.2136/sssaj1985.03615995004900030003x

- NEESER, C., J.A. DILLE, G. KRISHNAN, D.A. MORTENSEN, J.T. RAWLINSON, A.R. MARTIN und L.B. BILLS, 2004. WeedSOFT®: a weed management decision support system. *Weed Science*, 52(1), S. 115-122. DOI: 10.1614/P2002-154
- NUTTER, J.F.W., M. GLEASON, J.H. JENCO und N.C. CHRISTIANS, 1993. Assessing the accuracy, intra-rater repeatability, and inter-rater reliability of disease assessment systems. *Phytopathology*, 83(8), S. 806-812. DOI: 10.1094/Phyto-83-806
- PITSYK, V., J. PFROMBECK und M. GANDORFER, 2025. Economics of site-specific weed management: a review. *Precision agriculture* '25, S. 1045-1053. DOI: 10.1163/9789004725232_137
- RAJCAN, I. und C.J. SWANTON, 2001. Understanding maize–weed competition: resource competition, light quality and the whole plant. *Field Crops Research*, 71(2), S. 139-150. DOI: 10.1016/S0378-4290(01)00159-9
- REDMON, J., S. DIVVALA, R. GIRSHICK und A. FARHADI, 2016. You Only Look Once: unified, real-time object detection. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, S. 779-788.
- RIDER, T.W., J.W. VOGEL, J.A. DILLE, K.C. DHUYVETTER und T.L. KASTENS, 2006. An economic evaluation of site-specific herbicide application. *Precision Agriculture*, 7(6), S. 379-392. DOI: 10.1007/s11119-006-9012-y
- SAPKOTA, R., R.H. CHEPPALLY, A. SHARDA und M. KARKEE, 2025. YOLO26: Key architectural enhancements and performance benchmarking for real-time object detection. *arXiv preprint*. DOI: 10.48550/arXiv.2509.25164
- VASWANI, A., N. SHAZEER, N. PARMAR, J. USZKOREIT, L. JONES, A.N. GOMEZ, Ł. KAISER und I. POLOSUKHIN, 2017. Attention is all you need. In: U. von LUXBURG, I. GUYON, S. BENGIO, H. WALLACH, R. FERGUS, S.V.N. VISHWANATHAN und R. GARNETT, Hg. *Advances in neural information processing systems. 31st Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc.
- WAN, N.-F., L. FU, M. DAINESE, L.P. KIÆR, Y.-Q. HU, F. XIN, D. GOULSON, B.A. WOODCOCK, A.J. VANBERGEN, D.J. SPURGEON, S. SHEN und C. SCHERBER, 2025. Pesticides have negative effects on non-target organisms. *Nature communications*, 16, S. 1360. DOI: 10.1038/s41467-025-56732-x
- ZHANG, H., M. CISSE, Y.N. DAUPHIN und D. LOPEZ-PAZ, 2018. Mixup: Beyond empirical risk minimization. In: *6th International Conference on Learning Representations*.
- ZHAO, Y., W. LV, S. XU, J. WEI, G. WANG, Q. DANG, Y. LIU und J. CHEN, 2024. DETRs Beat YOLOs on real-time object detection. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (ICPV)*, S. 16965-16974.

Anschrift der Autoren

Jan Jänicke
Technologie- und Förderzentrum
Schulgasse 18
94315 Straubing
E-Mail: pflanze@tfz.bayern.de

Vladyslav Pitsyk
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik
Hans-Loher-Str. 32
94099 Ruhstorf a.d. Rott
E-Mail: digitalfarming@lfl.bayern.de

Dr. Nikita Genze
Technische Universität München, TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit,
Bioinformatik
Petersgasse 18
94315 Straubing
und
Hochschule Weihenstephan Triesdorf, Bioinformatik
Petersgasse 18
94315 Straubing
E-Mail: nikita.genze@tum.de

Dr. Johanna Pfrombeck
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik
Hans-Loher-Str. 32
94099 Ruhstorf a.d. Rott
E-Mail: johanna.pfrombeck@lfl.bayern.de

Stefan Kopfinger
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik
Hans-Loher-Str. 32
94099 Ruhstorf a.d. Rott
E-Mail: stefan.kopfinger@lfl.bayern.de
PD Dr. Markus Gandorfer

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik
Hans-Loher-Str. 32
94099 Ruhstorf a.d. Rott
E-Mail: markus.gandorfer@lfl.bayern.de

Prof. Dr. Dominik G. Grimm
Technische Universität München, TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit,
Bioinformatik
Petersgasse 18
94315 Straubing
und
Hochschule Weihenstephan Triesdorf, Bioinformatik
Petersgasse 18
94315 Straubing
E-Mail: dominik.grimm@tum.de

Michael Grieb
Technologie- und Förderzentrum
Schulgasse 18
94315 Straubing
E-Mail: michael.grieb@tfz.bayern.de

Anhang

Anhang 1: Übersicht über die in Stufe 1 zur Applikationskartenerstellung verwendeten Flächen

Feld- bezeich- nung	Aufnah- me Jahr	Befloge- ne Fläche [ha]	verwen- dete Drohne	Wetter	BBCH- Stadium	ökologische Bewirtschaf- tung?	Befliegungs- zeit bei GSD = 0,30 cm/px [min]
R004	2024	7,7	M300	bewölkt	12-13	Nein	21
R007	2024	1,2	M300	sonnig	12	Nein	3
R009	2024	1,9	M300	bewölkt	12-13	Nein	13
R011	2024	6,7	M300	bewölkt	12-13	Nein	20
R013	2024	1,4	M300	sonnig	12-13	Nein	5
R014	2024	1,1	M300	bewölkt	12-13	Nein	5
R015	2024	1,2	M300	bewölkt	12-13	Nein	4
R016	2024	0.4	M300	sonnig	12-13	Nein	5
R017	2024	1,8	M300	sonnig	12	Nein	5
R020	2024	11,3	M300	bewölkt	13	Ja	30
R026	2024	4,3	M300	bewölkt	13	Ja	13
R033	2024	10,2	M300	bewölkt	12-13	Nein	23
R034	2024	1,4	M300	sonnig	12-13	Nein	3
R035	2024	0.4	M300	sonnig	12-13	Nein	3

Anhang 2: Übersicht über die in Stufe 2 zur ökonomischen Bewertung verwendeten Flächen

Feld- bezeich- nung	Aufnah- me Jahr	Befloge- ne Fläche [ha]	verwen- dete Drohne	Wetter	BBCH- Stadium	ökologische Bewirtschaf- tung?	Befliegungs- zeit bei GSD = 0,15 cm/px [min]
R101	2025	1,0	M300	bewölkt	14	Nein	31
R102	2025	1,4	M300	bewölkt	13	Nein	42
R103	2025	0,5	M300	sonnig	14	Nein	17
R104	2025	1,2	M300	bewölkt	13	Nein	36
R105	2025	0,3	M300	sonnig	13	Nein	12
R106	2025	1,5	M300	sonnig	13	Nein	43
R107	2025	1,4	M300	sonnig	14	Nein	42
R109	2025	5,4	M300	sonnig	12	Nein	154
R110	2025	5,3	M300	sonnig	12	Nein	152
R112	2025	6,1	M300	sonnig	13	Nein	169
R113	2025	2,6	M300	sonnig	12	Nein	74
R114	2025	6,0	M300	sonnig	12	Nein	181
R115	2025	5,6	M300	sonnig	12	Nein	169
R116	2025	5,6	M300	sonnig	13 + 15	Ja	161
R117	2025	3,5	M300	bewölkt	16	Ja	101
R118	2025	1,2	M300	bewölkt	13 + 15	Ja	36
R120	2025	7,2	M300	bewölkt	13 + 16	Ja	220
R127	2025	5,8	M300	sonnig	13 + 15	Ja	166
R128	2025	8,3	M300	sonnig	13	Ja	233
SR015	2024	1,1	M300	bewölkt	13	Nein	31
SR103	2025	0,8	M3M	sonnig	12	Nein	25
SR105	2025	1,1	M3M	bewölkt	12	Nein	33
SR107	2025	1,5	M3M	bewölkt	12-13	Nein	43
SR109	2025	1,6	M3M	bewölkt	12	Ja	48
SR110	2025	1,7	M3M	sonnig	11-12	Ja	49
SR113	2025	3,3	M3M	sonnig	11-12	Nein	96
SR114	2025	1,9	M3M	sonnig + bewölkt	12	Nein	56

Anm.: Bei den Flächen, R116, R118, R120 und R127 wurden zwei Befliegungen durchgeführt, da dort zwei Beikrautbehandlungen in frühen Stadien vorgesehen waren.