

Mechanische Beikrautregulierung mit Hackrobotern

Informationen für die Praxis in Bayern (Stand: Februar 2025)



Bild 1: FarmDroid - FD20



Bild 2: Farming Revolution
- Farming GT



Bild 3: Naio Technologies -
Oz



Bild 4: Naio Technologies -
Dino

Die effiziente Regulierung von Beikräutern stellt eine wichtige Kulturmaßnahme dar, um ein ungestörtes Wachstum der Kulturpflanzen zu gewährleisten und somit hohe Erträge zu sichern. Zunehmende Einschränkungen des Herbizideinsatzes, ein Mangel an Saisonarbeitskräften und steigende Löhne stellen viele Anbauende vor die Frage, wie in Zukunft eine effektive Beikrautregulierung im Gartenbau gestaltet werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Innovative Methoden zur ökologischen Beikrautregulierung im Gartenbau“ wurden in der Zeit von Dezember 2021 bis Februar 2025 verschiedene Hackroboter erprobt und bewertet.

Inhaltsverzeichnis

1 Marktentwicklung und Technikübersicht	2
2 Die Versuchsergebnisse des Forschungsprojekts in Kürze	3
3 Ökonomische Einschätzung des aktuellen technischen Entwicklungsstands und Kostenkalkulation	3
4 Betriebsindividuelle Rentabilität	6
5 Betriebliche Voraussetzungen für den Robotereinsatz	8
6 Die richtige Aussaat oder Pflanzung für den Roboter	9
7 Autonomes Hacken	10
8 Funktionalitätsbeurteilung der Hackroboter	10

1 Marktentwicklung und Technikübersicht

Im Bereich der Beikrautregulierung wurden in den vergangenen Jahren viele alternative Methoden zum Glyphosateinsatz getestet. Häufig standen dabei neue Kombinationen aus verschiedenen Herbiziden sowie konventionelle Hackgeräte im Mittelpunkt (Boullard 2020; Rank 2020; Savage und Zorner 1996). Die Hackwerkzeuge arbeiteten dabei stetig genauer und inzwischen können zum Beispiel im Gemüsebau mit Sensortechnik und RTK-Steuerung sehr exakte Hackergebnisse erzielt werden (Staub und Brell 2019). Die weitere Automatisierung der Hackgeräte läuft bereits seit einigen Jahren (AIL 2019; Knoll, *et al.* 2018). Autonome Roboter sollen zur Beikrautkontrolle eingesetzt werden. Diese können sowohl mit als auch ohne eine Erkennung der Pflanzen ausgestattet sein. Bei letzterem werden bei der Aussaat die Position der einzelnen Saatkörner georeferenziert markiert und diese Koordinaten zur anschließenden Beikrautregulierung an der Saatreihe genutzt (Griepentrog, *et al.* 2005). Weiterhin gibt es bereits Anbaugeräte, die über Kamerasysteme Kulturpflanzen von Beikräutern unterscheiden können. Diese Ausstattung ermöglicht das Hacken innerhalb der Reihe (Garford Farm Machinery Ltd 2025). Damit die Agrarroboter eigenständig fahren und arbeiten können, benötigen sie noch weitere Techniken. Sensoren, wie Kameras, Laserscanner oder Ultraschall, sollen bei der Lokalisation des Roboters im dreidimensionalen Raum unterstützen und können als Abstandssensoren dienen. So kann beispielsweise eine sichere Befahrung der Spur mit Hinderniserkennung gewährleistet werden. Am häufigsten verbaute Sensoren gemessen an 62 Agrarrobotern sind RGB-Kameras (32 %), RTK/GNSS/INS-Bauteile (20 %), LiDAR-Sensoren (17 %) oder RGBD-Tiefenkameras (9 %; Oliveira, *et al.* 2021). Außerdem sollen Tiefe Neuronale Netze dabei unterstützen, die Umgebung zu klassifizieren bzw. zwischen Kulturpflanze, Beikraut und Boden zu unterscheiden. Die Pflanzenerkennung ermöglicht dann das Hacken innerhalb der Reihe. Aber auch die Navigation ist nicht ausschließlich über RTK, sondern ebenso durch die Reihenverfolgung aus dem Kamerabild möglich (de Silva, *et al.* 2024). Auch bei den Antriebstechnologien führt ein gesteigertes Umweltbewusstsein sowie Teuerungen beim Kraftstoffkauf zu Veränderungen (Ghobadpour, *et al.* 2022). Einige Roboter werden elektrisch angetrieben - autark über Photovoltaik oder netzgebunden. Oliveira *et al.* evaluierten 2021 die Eigenschaften der aktuellen Agrarroboter, um Trends sowie Herausforderungen herauszuarbeiten. Allradantrieb sowie Allradlenkung sind am häufigsten vorzufinden (Oliveira, *et al.* 2021). Dies ermöglicht den Betrieb im unebenen Terrain und unterstützt Wendemanöver auf engstem Raum. Die Roboter sind entweder speziell für das Hacken konzipiert und verfügen beispielsweise über fest verbaute aktive Hackwerkzeuge, welche die Beikrautregulierung

RGB-Kamera: Erzeugung farbiger Bilder von Objekten auf Basis von Rot, Grün und Blau (RGB)

RGBD-Tiefenkamera: vereint Farbdaten (RGB) mit Tiefeninformationen, wodurch Objekte leichter identifiziert werden können

GNSS-Bauteile (Global Navigation Satellite System): nutzen das Navigationssatellitensystem

RTK (Real-time Kinematic Positioning): Lokalisierung über Positionskoordinaten der Satelliten präzisiert durch eine Basisstation

INS (inertiales Navigationssystem): referenzlose Bestimmung der räumlichen Bewegung und Lokalisation; Nachteil des Abdrifts von tatsächlicher Position, Vorteil der Unabhängigkeit vom Satellitenempfang

LiDAR: Light Detection and Ranging, Technologie zur Umfelderkennung

sowohl zwischen als auch in den Reihen beherrschen, oder fungieren als autonomes Trägerfahrzeug, an welches verschiedene Anbaugeräte angehängt werden können. Erst 19 % der bekannten Agrarroboter sind kommerziell gelistet, die übrigen 81 % der Roboter befinden sich noch in der Entwicklung. Dies zeigt, dass zukünftig mit einigen Überarbeitungen und weiterem technischen Fortschritt zu rechnen ist.

2 Die Versuchsergebnisse des Forschungsprojekts in Kürze

Es wurden die Roboter „Farming GT“ (Farming Revolution), „FD20“ (FarmDroid) und „Dino“ (Naio Technologies) in verschiedenen Gemüsekulturen erprobt und bewertet. Der Roboter „Oz“ (Naio Technologies) war in einer Obstbaumschule im Einsatz. Die Maschinen basierten auf unterschiedlichen Techniken der Navigation, Pflanzenerkennung oder Antriebsart. Grundsätzlich sind alle erprobten Hackroboter in der Lage, gute Hackergebnisse zu erzielen und mit der konventionellen Hacktechnik mitzuhalten. Allerdings war der Einsatz der Maschinen bisher nicht zuverlässig möglich. Zusätzlich sollten einige Voraussetzungen der Feldbeschaffenheit erfüllt sein, sodass die Roboter zufriedenstellende Hackergebnisse liefern können. Im Projektzeitraum konnten bereits einige technische Überarbeitungen eingepflegt werden, die zu einer Verbesserung der Geräte geführt haben. Diese Weiterentwicklungen wird es auch zukünftig benötigen, um die Hackroboter zuverlässig arbeiten zu lassen. Aufgrund der kompakten Abmessungen des Roboters „Oz“ war im Obstbaumschulversuch die Reduzierung der Reihenabstände auf 90 cm möglich. Im Versuch hat die Engpflanzung zu keinen Nachteilen hinsichtlich der Baumqualitäten geführt. Ein Katalog zur Funktionalitätsbeurteilung der erprobten Roboter befindet sich in Kapitel 8.

3 Ökonomische Einschätzung des aktuellen technischen Entwicklungsstands und Kostenkalkulation

Derzeit sind die Hackroboter im Gartenbau wirtschaftlich nicht allumfassend rentabel einsetzbar (Tabelle 1). Dies liegt vor allem auch daran, dass die Roboter nicht vollständig zuverlässig arbeiten und aktuell mit viel Arbeitszeit für Fehlerbehebungen kalkuliert werden muss. Zudem sind die Anschaffungswerte der Geräte hoch. Gegenwärtig gibt es in Bayern eine Förderung in Höhe von 40 %, welche die Anschaffung schneller rentabel macht. Dennoch ist eine Technikaffinität von Vorteil und der Roboter sollte möglichst gut in den Betriebsablauf integriert werden. Andererseits sollten sich die entwickelten Agrarroboter möglichst leicht in die bestehenden Pflanzenbausysteme integrieren können, um den Anwendern den Einstieg in die Robotik zu vereinfachen. Aufgrund der eigenen Erfahrungswerte steigt die Lernkurve mit der Zahl der Robotereinsätze und ermöglicht in den Folgejahren vermutlich das Erzielen besserer Hackergebnisse. Für Betriebe mit kleinen Schlaggrößen ist der logistische Aufwand des Robotertransports ein erheblicher wirtschaftlicher Nachteil. Hier kann die Beikrautregulierung mit einer kamerageführten Hacke als Anbaugerät zeitlich und wirtschaftlich vorteilhafter abschneiden. Ob sich eine Investition in einen Roboter lohnen kann, hängt aber auch von einigen weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise das Kultursortiment des Betriebs oder potentiell weitere Anwendungsbereiche für den Roboter. Da die neuen Technologien noch in der Entwicklung sind, benötigt der Anwender neben der Technikaffinität auch die Anpassungsfähigkeit und Flexibilität, sich schnell in neue technische Überarbeitungen einzulernen. Kreative Lösungen, die Anbauverfahren des Betriebs auf den Roboter anzupassen, könnten weitere Möglichkeiten bieten, um die Rentabilität der Systeme zu steigern – siehe Ertragssteigerung mit dem Roboter „Oz“ infolge der Engpflanzung in einer Obstbaumschule. Einen weiteren Kostenfaktor stellen

technische „Kinderkrankheiten“ dar. Teilweise konnten Roboter störungsbedingt nicht in einer zuverlässigen Weise eingesetzt werden. Anwender sollten frustrationstolerant sein und Alternativlösungen parat haben, sodass ein mehrtägiger bis mehrwöchiger Ausfall des Roboters keine relevanten Ertragsverluste nach sich zieht. Gleichzeitig bieten die Roboter keine Absicherung vor Hackschäden, sondern führten gegenteilig in den Versuchen - abhängig von der verwendeten Technik, der Kulturauswahl und den Hackeinstellungen - zu leicht erhöhten Zahlen an Hackschäden, verglichen mit der betriebsüblichen Kombination aus Maschinenhacke und Handhacke. Die Aggressivität der Hackwerkzeuge, d.h. wie nah diese an die Kulturpflanzen heranarbeiten sollen, ist einstellbar. Somit ist aus einem Kompromiss zwischen Hackschäden oder Beikrautbewuchs zu wählen. Unter optimalen Bedingungen schnitten die Roboter am besten ab. Ein weiterer Punkt kann die Investitionsfreude in neue Unternehmen trüben: Das Risiko von Finanzierungsproblemen könnte bestehen, da die Entwicklung häufig noch am Anfang steht und technische „Kinderkrankheiten“ die Kaufnachfrage dämpfen, aber viele Investitionen notwendig sind. Dies wiederum stellt ein weiteres Risiko für den Käufer dar, weil somit keine Garantie für eine zukunftssichere technische Betreuung oder Überarbeitung des angeschafften Roboters gewährleistet ist, sollte ein Unternehmen insolvent gehen. Ein wichtiger Treiber für eine Investition in einen Hackroboter ist der Mangel an Saisonarbeitskräften. Aktuell sollte der Einsatz des Hackroboters allerdings auch immer mit dem Einsatz von Handhackkräften kombiniert werden, da die Hackergebnisse nur dann ausreichend gut sind. Eine weitere Rolle spielen in diesem Zug zukünftig steigende Lohnkosten, welche den Einsatz eines Roboters rentabler werden lassen könnten. Ein weiterer Einflussfaktor der Kaufentscheidung ist die politische Entscheidungskraft, welche sich unter anderem niederschlägt in: Förderprogrammen von innovativen Lösungen zur herbizidfreien Beikrautregulierung, weiteren Einschränkungen von Herbiziden, dem Wunsch nach einem Ausbau der ökologisch bewirtschafteten Flächen sowie Anpassungen des Mindestlohns oder Anwerbung von Arbeitskräften. Aber auch grundlegende technische Entwicklungen, beispielsweise im Bereich von „Big Data“ oder der Baukomponenten, könnten zukünftig die Entwicklung und Rentabilität eines Hackroboters beeinflussen. Auch rechtliche Rahmenbedingungen und Haftung sollten für eine Etablierung der Systeme geklärt werden. Des Weiteren spielen Datensicherheit und -hoheit der von den Robotern aufgenommene Daten eine Rolle (Schleicher und Gandorfer 2018). In der Kultur Zuckerrübe war der „FD20“ von FarmDroid bereits wirtschaftlich einsetzbar, trotz Handhacke nach Reihenschluss (Spykman, *et al.* 2023). Für die Öko-Zuckerrübe muss mit einer Vielzahl an Handhackstunden gerechnet werden. In solchen Spezialkulturen mit einem hohen Aufwand an Arbeitskraftstunden sind die Investitionskosten der Roboter schneller rentabel. Dies wird auch für den ökologischen Gemüse- und Beerenanbau prognostiziert (Henseling, *et al.* 2022). In diesem Bereich besteht jedoch die Herausforderung, dass die Anbausysteme der unterschiedlichen Kulturen mitunter sehr variabel gestaltet sein können und häufige Anpassungen der Geräte oder gar Veränderungen der Anbauverfahren eine Hürde für die Etablierung der Hackroboter im Gemüse- und Beerenanbau darstellen.

Für die im Projekt erprobten Hackroboter „Farming GT“, „FD20“ und „Oz“ wurden die Arbeits erledigungskosten kalkuliert (Tabelle 1). Zur Berechnung der Arbeitserledigungskosten der Beikrautregulierung mit dem Roboter wurden die Lohnkosten mit den Maschinenkosten zusammenaddiert. Die Lohnkosten ergaben sich aus dem Stundenlohn der Arbeitskraft (17,31 €/Akh, Mindestlohn 2024) multipliziert mit dem Arbeitszeitbedarf. Die Maschinenkosten setzten sich aus den Kosten pro Maschinenstunde und dem Zeitbedarf für einen Hektar zusammen. Es wurde eine vollständige Auslastung der Maschine auf einer optimal großen Fläche angenommen, die sich direkt an den Hof anschließt. Wegezeiten wurden nicht

berücksichtigt. Die wöchentliche Arbeitskapazität des „Oz“ lag bei circa 2,4 ha. Für den „FD20“ sollten maximal 20 ha/Woche angesetzt werden. Der „Farming GT“ erreichte eine wöchentliche Arbeitskapazität von 9,8 ha/Woche. Die Förderung in Höhe von 40 % wurde nicht berücksichtigt. In den Praxisversuchen unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren (z. B. erhöhte Arbeitszeiten durch Störungen und Ausfälle des Roboters, Wegezeiten) konnten die Roboter nur zum Teil mit der konventionellen Technik wirtschaftlich mithalten. Das pessimistisch gerechnete Szenario ist aktuell als das realistischere einzuschätzen. Perspektivisch könnte sich die Wirtschaftlichkeit auf das optimistische Szenario verbessern.

Tabelle 1: Kostenkalkulation der Arbeiterledigungskosten der Beikrautregulierung mit dem Roboter im Vergleich zur konventionellen Hacktechnik. Für die Roboter wurde von optimalen Hackbedingungen, reibungsloser Betrieb ohne Störungen und einer vollständigen Auslastung des Geräts ausgegangen. Für die konventionelle Hacktechnik wurden die Daten des KTBL veranschlagt. Die Abweichungen der Roboterwirtschaftlichkeit im Vergleich zur konventionellen Hacktechnik (in %) repräsentieren ein pessimistisches bis optimistisches Szenario. Das pessimistische Szenario nimmt Zeiten zur vollständigen Beaufsichtigung des Roboters an. Im optimistischen Szenario werden Betreuungszeiten des Geräts nicht berücksichtigt (Zahl in Klammern). Ein günstigeres Abschneiden des Roboters gegenüber der konventionellen Hacke ist in Grün gekennzeichnet, eine Verteuerung in Rot.

Kulturauswahl	Konventionelle mechanische Hacktechnik	Hackroboter „Farming GT“ (Farming Revolution)	Hackroboter „FD20“ (FarmDroid)	Roboter „Oz“ (Naio Technologies)
Zwiebel	1842 €/ha	+53 % (-0,4 %)	-27 % (-70 %)	-
Salat	1080 €/ha	-	-50 % (-79 %)	*Es werden 75-90 cm Reihenabstand benötigt, daher ist der Roboter in eng stehenden Kulturen weniger rentabel
Kopfkohl	797 €/ha	+102 % (+31 %)	-33 % (-72 %)	
Knollensellerie	5471 €/ha	-34 % (-57 %)	-	
Rote Bete	1864 €/ha	-14 % (-44 %)	-64 % (-85 %)	

Anmerkung zur Kalkulation:

Werden weitere Einflussfaktoren berücksichtigt, wie z. B. erhöhte Arbeitszeiten durch Störungen und Ausfälle des Roboters oder Wegezeiten, konnten die Roboter wirtschaftlich weniger gut mit der konventionellen Technik konkurrieren. Eine vollständige Auslastung der Geräte ist beim aktuellen Entwicklungsstand schwer möglich gewesen. Die Maschinenkosten könnten zudem höher ausfallen, da die Abschreibung auf 12 Jahre angesetzt wurde, was den KTBL-Standardwerten entspricht, aber für Hackroboter nur spekulativ angewendet werden kann. Zusätzlich sind mitunter Hackschäden und eine geschulte Arbeitskraft einzukalkulieren.

Der „FD20“ schnitt über alle getesteten Kulturen hinweg günstiger als die konventionelle Hacke ab, die Notwendigkeit der Aussaat und die geringe Einstellbarkeit des Hackwerks machen den Roboter für einige Kulturen wie beispielsweise den Chinakohl aber weniger einsatzfähig. Beim „Farming GT“ schnitten insbesondere die Kulturen gut ab, die der Zuckerrübe ähnlich sind, für welche der Roboter ursprünglich konzipiert wurde. Der „Oz“ benötigte im ersten Versuchsjahr einen erhöhten Arbeitszeitbedarf aufgrund von technischen Störungen. Im zweiten Versuchsjahr unterschied sich der Arbeitsaufwand für den Roboter nur noch geringfügig von der Maschinenhacke. Auch wenn der „Oz“ die Beikrautregulierung verteuerte, war der große Vorteil eine Steigerung des Flächenertrags aufgrund der kompakten Abmessungen des Roboters. Dadurch konnten die Bäume auf 90 cm gepflanzt und der Ertrag um rund 30 % erhöht werden. Je nach Kultursortiment kann der erhöhte Flächenertrag die Mehrkosten des Aufwands mit dem Roboter aufwiegen. Es sollte grundsätzlich mit leichten Ertragsverlusten aufgrund von Hackschäden kalkuliert werden.

4 Betriebsindividuelle Rentabilität

Die Anschaffung eines Roboters zur Beikrautregulierung sollte gut überlegt werden. Die Kalkulationen, die im vorliegenden Bericht beschrieben worden sind, geben einen ersten Anhaltspunkt zur Wirtschaftlichkeit. Da eine Vielzahl an Faktoren die Rentabilität der Systeme beeinflusst, sollte betriebsindividuell berechnet werden, ob sich die Anschaffung eines Roboters lohnt. Dazu können verschiedene Kriterien bedacht werden:

Robotereigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten

Die Roboter basierten grundsätzlich auf verschiedenen Technologien. Bei kameragestützten Geräten, die mit Pflanzenerkennung arbeiteten, sollte die Liste der bereits eingelernten Kulturen mit dem eigenen Kultursortiment abgeglichen werden. Für Kulturen, die nicht gelistet sind, kann der Hersteller angefragt werden. Das Einlernen einer neuen Kultur kann unterschiedlich schnell verlaufen. Es sollte jedoch sicherheitshalber mehr Zeit einkalkuliert werden und eine Alternativlösung parat sein beziehungsweise potenzielle Ertragsverluste einberechnet werden.

Des Weiteren existieren verschiedene Antriebstechnologien. Bei elektrisch angetriebenen Robotern müssen Ladepausen und Transporte zu einer Stromquelle eingeplant werden. Im Optimalfall arbeitet der Roboter auf einer Fläche, die in der Nähe einer Unterstellmöglichkeit und einem Stromanschluss lokalisiert ist. Roboter, die autark über PV-Module betrieben werden, sind auf ausreichend Sonnenenergie angewiesen. Der „FD20“ zeigte im Versuch eine ausreichende Energieversorgung an sonnigen Tagen. Bei starker Bewölkung war der Energieverbrauch mitunter höher als die Energieproduktion. Bei einer frühen Aussaat und einer damit verbundenen Nutzung des Roboters vor April ist ebenfalls mit einer nicht ausreichenden Energieversorgung über die PV-Module zu rechnen. Entsprechend sollte eine verringerte Schlagkraft des Roboters kalkuliert werden, da das Aufladen und Wechseln einer Batterie erforderlich ist. Dies benötigt zudem eine Arbeitskraft, die sich um diese zusätzliche Logistik kümmern muss. Andererseits müssen auch Geräte mit Verbrennungsmotor mit Kraftstoff betankt werden.

Weiterhin sind auf dem Markt Spezialgeräte zum Hacken und Plattformroboter verfügbar. Die Plattformroboter fungieren als autonomes Trägerfahrzeug, an welches verschiedene Anbaugeräte angehängt werden können. Diese sind ergo flexibel einsetzbar und können eine höhere Zahl an Anwendungsbereichen abdecken (Säen, Transportieren, Hacken etc.). Die Spezialgeräte sind direkt für die Beikrautregulierung konzipiert und beispielsweise mit festverbauten aktiven Hackwerkzeugen ausgestattet. Diese ermöglichen ein Hacken zwischen und in der Reihe. Roboter, die georeferenziert arbeiten, wie beispielsweise der „FD20“, müssen selbst aussäen, um anschließend hacken zu können. Dazu bieten sich vor allem klassische Säekulturen an. Das Saatkorn sollte nicht größer als die Zuckerrübenpille sein.

Kultursortiment

Ob ein Hacken in der Reihe möglich ist, entscheidet die Kulturauswahl. Für eng gesäte Kulturen wie Spinat liefert die konventionelle Maschinenhacke, die zwischen den Reihen hackt, ähnliche Ergebnisse wie der Roboter, dessen aktive Hackwerkzeuge erst ab 12 cm Pflanzabstand in die Reihe hineinarbeiten können. Für eng stehende Kulturen lohnt sich die Anschaffung einer InRow-Hacke mit Pflanzenerkennung folglich weniger. Für die Zwiebel ist eine Aussaat im Horst zu überlegen, damit der Roboter leichter in die Reihen hineinarbeiten kann. Bei einer 5-Korn-Horstsaat kann mit Relativerträgen von 96 % kalkuliert werden (Laber und Krachunova 2020). Im Kopfkohl schnitten die Roboter am geringsten konkurrenzfähig gegenüber der

konventionellen ökologischen Beikrautregulierung ab. Pflanzen, die schnell in die Höhe wachsen oder früh die Reihen schließen, sind für den Roboter nur in einem kurzen Zeitfenster hackbar. In Zuckerrüben oder ähnlich gewachsenen Kulturen konnten die Roboter eher mit der betriebsüblichen Hacke mithalten. Es ist zu prüfen, ob ein Roboter mit kompakten Abmessungen, wie der im Projekt erprobte „Oz“, Vorteile des Anbauverfahrens im Obstbau bzw. Baumschule mit sich bringt. Der Einsatz des schmalen Roboters führte zu einer Ertragssteigerung aufgrund der Engpflanzung. Dies könnte insbesondere in teuren Kulturen den Gewinnbeitrag steigern. In Gemüsekulturen, die üblicherweise einen Reihenabstand von deutlich weniger als 90 cm aufweisen, wäre der Einsatz des Roboters mit einem geringeren Flächenertrag verbunden und damit weniger rentabel. Generell sollte geprüft werden, ob eine Anpassung des Anbauverfahrens wirtschaftlich interessant sein könnte. Wer andersherum keine Veränderungen seines Anbausystems durchführen möchte, sollte einen Roboter wählen, der die vorliegenden Begebenheiten toleriert.

Betriebsstruktur

Letztendlich hängt die Wirtschaftlichkeit auch davon ab, wie gut der Käufer den Roboter in den Betriebsablauf integrieren kann bzw. wie anpassungsfähig der Roboter ist, um schnell in den betrieblichen Ablauf integriert werden zu können. Einen großen Anteil an der Saisonleistung der Roboter, haben die Schlaggrößen. Die durchschnittliche Schlaggröße in Bayern lag laut Agrarstrukturerhebung 2014 bei 1,74 ha (Zenger und Friebe 2015). Je kleinstrukturierter die Betriebsflächen sind, desto höher müssen Rüstzeiten und Wegezeiten veranschlagt werden, was die Wirtschaftlichkeit reduziert.

Technische Weiterentwicklungen und Technikaffinität

Technische Weiterentwicklungen der Roboter könnten in Zukunft zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beitragen. Eine zuverlässige, störungsfreie Arbeit der Roboter würde die Schlagkraft der Geräte erhöhen und Arbeitszeiten der Betreuung und Problemlösung verringern. Zudem könnte eine gesteigerte Roboterproduktionszahl oder eine Vergünstigung der Bauelemente zu niedrigeren Anschaffungspreisen führen. Die technischen Überarbeitungen setzen beim Anwender allerdings voraus, sich in Neuheiten schnell einarbeiten zu können und zu wollen. Wer interessiert an den neuesten Technologien ist, beschäftigt sich vermutlich lieber mit der Robotik und löst Störungen eventuell effektiver, arbeitet sich schneller in Neuerungen ein oder hat kreative Lösungen, die den Einsatz des Roboters besser gestalten könnten.

Fördermöglichkeiten

Über das Bayerische Sonderprogramm Landwirtschaft Digital (BaySL Digital) Teil C werden derzeit bis zum 31. Dezember 2027 Investitionen in digitale Hack- und Pflanzenschutztechnik zur Reduzierung des Herbizideinsatzes unterstützt (StMELF 2024). Der Fördersatz beträgt 40 %. Förderfähig für die Kategorie der Feldroboter ist eine Summe von 500 € bis 100.000 €. Somit kann ein Feldroboter mit max. 40.000 € bezuschusst werden. Eine Antragstellung ist über iBALIS möglich. Neben den Feldrobotern fallen beispielsweise auch vollautomatische Reihengeräte, elektronische Reihenführungen sowie Pflanzenschutzgeräte mit Zielflächenerkennung unter das Förderprogramm. Die detaillierte Produktliste kann online abgerufen werden (<https://www.stmelf.bayern.de/ibalis/baysldigital/richtliniell/produktlisteC.html>). Zudem ist

es möglich, der Produktliste weitere Geräte hinzufügen zu lassen, sollten diese den Anforderungen entsprechen.

Wichtiges in Kürze

Je nach Kultursortiment, Anwendungsbereich und Betriebsstruktur sollte genau überlegt werden, ob und welche Version des Roboters sich für den eigenen Betrieb rechnen kann. Klar ist, dass sich die autonome Hacktechnik in den kommenden Jahren noch weiterentwickeln und verbessern wird. Die aktuell erhältliche Technik ist in der Lage mit konventioneller Technik mithalten, hat aber noch immer „Kinderkrankheiten“, die es in den nächsten Jahren auszumerzen gilt. Wer allerdings technikaffin ist und den Roboter gut in seinen Betriebsablauf integrieren kann, für den ist die Anschaffung auch heute schon eine Überlegung wert.

5 Betriebliche Voraussetzungen für den Robotereinsatz

Grundsätzlich war mit den Robotern bereits heute eine erfolgreiche Beikrautregulierung möglich. Es gab allerdings einige Voraussetzungen, beispielsweise bezüglich der Feldbeschaffenheit, die erfüllt sein sollten, um einen guten Einsatz der Geräte zu gewährleisten. Ein roboter-tauglicher Bestand hat möglichst ebene Flächen mit wenig oder keiner Hangneigung. Das Vorgewende sollte ausreichend groß und ohne Hindernisse sein, sodass der Roboter die Wendemanöver automatisch durchführen kann. Die Fläche sollte möglichst frei von Steinen sein, da sich diese in den Hackwerkzeugen verfangen können und unbeobachtet, eine Kulturreihe stark beschädigen können. Ein regelmäßiges Hacken bot sich an, da einige Roboter Schwierigkeiten bei der Regulation hoher Beikräuter haben. Zusätzlich war der Hackzeitpunkt wetterbedingt relevant. Verkrustete Böden stellten eine Herausforderung für wenig leistungsstarke Roboter dar. Gerade Reihen und exakte Pflanzabstände erleichterten die Arbeit mit dem Roboter. Dies galt insbesondere für RTK-geführte Roboter, aber auch die kamerabasierten Systeme profitierten davon. Vor der Anschaffung sollte auf eine ausreichende Mobilfunkabdeckung geprüft werden. In der Baumschule sollte auf Durchfahrthöhe aufgeastet werden. Es bietet sich an, die Äste oder hohe Beikräuter aus der Spur zu entfernen, da sich diese im Hackwerk verfangen und zu einem außerplanmäßigen Halt des Roboters führen können. Grundsätzlich erzielten die autonomen Maschinen in den Kulturen, für welche sie konzipiert wurden, oder in ähnlichen Kulturen die besten Ergebnisse.

Es sollte nicht angenommen werden, dass die autonome Hacktechnik aktuell ein Selbstläufer ist, sondern die Roboter sollten als Unterstützung bei der Beikrautregulierung oder als Alternative zu konventionellen Systemen gesehen werden. Die Handhacke war in den Versuchen nicht vollständig zu ersetzen. Zudem sollte ein entsprechend geschulter Mitarbeiter den

Roboter betreuen, um Fehlermeldungen möglichst frühzeitig zu beheben und Transporte, Stromversorgung oder Saatgutbefüllung zu gewährleisten.

Wichtiges in Kürze

- keine Steine auf der Fläche, keine oder nur wenig Hanglage
- ausreichend großes Vorgewende einplanen, Bewässerung (Standort der Rohrleitungen) mit einplanen
- möglichst kein verkrusteter Boden
- optional Stromanschluss/Unterstellmöglichkeit in der Nähe
- Schlaggrößen beeinflussen Wirtschaftlichkeit
- Zeit für das Einlernen der Fläche einplanen und Koordinaten richtig setzen
- Gute Mobilfunkabdeckung
- in der Baumschule Aufasten auf Durchfahrhöhe
- Robotik ist aktuell kein Selbstläufer, ein geschulter Mitarbeiter sollte zur Betreuung einkalkuliert werden

6 Die richtige Aussaat oder Pflanzung für den Roboter

Roboter, wie der „FD20“ von FarmDroid, müssen selbst aussäen, um später hacken zu können. Dazu muss der Roboter entsprechend umgebaut werden. Anfangs sollten dazu sechs bis acht Arbeitskraftstunden eingeplant werden. Die mit Pflanzenerkennung ausgestatteten Roboter, wie der „Farming GT“ von Farming Revolution, können in jeden Bestand einfahren und sich anhand der Kamera orientieren. Gerade Reihen und exakte Pflanzabstände erleichtern die Arbeit mit dem Roboter. Dies gilt insbesondere auch für die RTK-gesteuerten Roboter, wie der „Oz“ von Nao Technologies. Grundsätzlich sollte die Aussaat oder die Pflanzung möglichst genau erfolgen. Die Geräte sind teilweise für unterschiedliche Reihenanzahlen erhältlich und ein Umbau mitunter nicht selbstständig möglich. Daher sollten vorab Informationen über den Roboter eingeholt werden und das Gerät am Betrieb immer für die gleiche Anzahl an Reihen eingesetzt werden. Eventuell ist eine Anpassung der Anbaumethode sinnvoll. Der Roboter „Oz“ war aufgrund seiner kompakten Abmaße in einer Engpflanzung einer Obstbaumschule im Einsatz – auf 90 cm statt 140 cm Reihenabstand. Die Aussaat der Zwiebel kann im Horst erfolgen, wenn die inRow-Hacke in die Reihe arbeiten soll. Denn dafür wird ein Pflanzabstand von mindestens 12 cm benötigt.

Wichtiges in Kürze

- Bauart des Roboters verlangt eventuell Roboter-Aussaat
- gerade Reihen und exakte Pflanzabstände beachten
- informieren, welche Reihenabstände eingehalten werden sollten
- optional betriebsübliche Aussaat/ Pflanzung anpassen, um den Roboter wirtschaftlicher einsetzen zu können

7 Autonomes Hacken

Das erste Hacken sollte frühestmöglich nach Aussaat oder Pflanzung stattfinden. Wie nah die Roboter an die Kulturpflanzen heranhacken sollen, ist einstellbar. Daher kann vor oder bei Feldaufgang bereits gehackt werden. Ein wöchentlicher Hackgang zeigte in den Versuchen die besten Ergebnisse. Dabei sollten die Hackwerkzeuge passend eingestellt sein. Je näher an den Kulturpflanzen gehackt wird, desto geringer wird der Beikrautdruck, es besteht jedoch das Risiko von Hackschäden und Ertragsverlusten.

Wenn Roboter eingesetzt werden, die nur zwischen den Reihen hacken können, muss in den Reihen weiterhin von Hand gehackt werden. Aber auch für die in der Reihe arbeitenden Geräte sollten Handhackkräfte eingeplant werden. Die Kombination aus Hackroboter und Handhacke zeigte die besten Ergebnisse in den Versuchen.

Weitere Informationen, die das Einlernen der Fläche, die Auftragsplanung und Steuerung der Roboter und weitere Funktionen betreffen, können dem Kapitel 8 entnommen werden. Dort werden die erprobten Roboter auch im Vergleich gegenübergestellt.

Wichtiges in Kürze

- wöchentlicher Hackrhythmus
- Hackergebnis beurteilen und anhand dessen passende Einstellungen vornehmen
- Kombination mit Handhacke
- vor dem ersten Hacken muss die Fläche eingemessen werden (Einlernen, Einmessen der Fläche und weitere Funktionen siehe Kapitel 8 „Funktionalitätsbeurteilung der Hackroboter“)

8 Funktionalitätsbeurteilung der Hackroboter

Während der Erprobung der Hackroboter wurden auch die Funktionalitäten der Systeme beurteilt und miteinander verglichen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Beurteilung der Funktionalität der erprobten Hackroboter „Farming GT“ (Farming Revolution), „FD20“ (FarmDroid) und „Oz“ (Naio Technologies)

Kriterium	Beurteilung „Farming GT“	Beurteilung „FD20“	Beurteilung „Oz“
Einlernen, Einmessen der Fläche	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache Bedienung über das Smartphone. - Beim Einlernen kann zeitgleich das erste Hacken erfolgen. - Der Roboter kann in jeden Bestand einfahren und orientiert sich über die Kamera anhand der Reihe. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mit dem Roboter müssen die Eckpunkte der Fläche angefahren werden. - Präzises Arbeiten in kleinstrukturierten Flächen ist eher schwierig. - Zukünftig soll ein GPS-Messstab das Einmessen erleichtern. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mit der Antenne des Roboters werden GPS-Koordinaten aufgezeichnet, dazu kann die Antenne vom Roboter abmontiert werden und bspw. auf dem Pflanzgerät mitgenommen werden, sodass keine weitere Durchfahrt notwendig ist.

		<ul style="list-style-type: none"> - Die Karte wird abgespeichert und kann wiederholt verwendet werden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Anhand der Geopunkte kann mittels der Naio-Software „Easy Mapping“ eine Karte erstellt werden (dies gestaltet sich semi-trivial). - Die Karte wird anschließend abgespeichert und kann vielfach verwendet werden.
Auftragsplanung	<ul style="list-style-type: none"> - Über die Smartphoneapplikation werden Feld/Kultur ausgewählt und das Hacken gestartet. 	<ul style="list-style-type: none"> - Das Feld wird am Display direkt am Roboter eingestellt. 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Karte und einige Voreinstellungen können über die App ausgewählt und das Hacken gestartet werden.
Steuerung, Handhabung	<ul style="list-style-type: none"> - Gesteuert wird über das Smartphone. - Die grundsätzliche Bedienung ist einfach, die Handhabung gut. Es gibt einige weitere Einstellmöglichkeiten. - Alternativ gibt es noch eine Kransteuerung, die direkt am Roboter verbaut ist. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesteuert wird an einem Schalter direkt am Roboter. - Mit dem nicht-geLenkten Vorderrad ist das Fahren auf unebener Strecke schwer, ist aber generell nur für kurze Distanzen gedacht. - Das Navigieren im Menü des HMI-Displays fällt nach einer Einführung und etwas Übung leichter. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesteuert wird der Roboter über das Smartphone. - Nach etwas Übung wird die Handhabung verständlich. - Die Einstellmöglichkeiten sind weniger vielfältig, da der Roboter nicht in der Reihe hackt.
Schlagkraft	<ul style="list-style-type: none"> - 0,1 - 0,2 ha/h 	<ul style="list-style-type: none"> - Max. 6,5 ha/Tag bzw. 3,6 h/ha 	<ul style="list-style-type: none"> - 800 – 1000 m²/h
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Muss auf einem Tieflader erfolgen, ca. PKW-Abmaße. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mit einer Dreipunktaufhängung am Schlepper (3 m Breite). 	<ul style="list-style-type: none"> - Kann in einen größeren PKW verladen werden.
Störanfälligkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Störungen bedingt durch GPS und Hackwerkregulierung sind aufgetreten. - Es gab weitere Updates. - Qualität des Hackgangs hängt von Pflanzenerkennung über die Kamera ab. - Akkuanzeige nicht immer korrekt, dadurch Ausfall auf der Fläche. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr gering im Versuch. - Saatfehler können vorkommen und werden über das Handy als Störung gemeldet. - Wegen Sonnenstürmen wurden die Dienste während 2024 an wenigen Tagen von der Firma beschränkt. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Störanfälligkeit im Versuch 2023, Bumper-Störungen, evtl. defekte Radmotoren. - Zeitweise Störungen des GPS-Signals.

Bedienung, Benutzeroberfläche	<ul style="list-style-type: none"> - Nach einer Einführung eine grundsätzlich übersichtliche Bedienung, im Menü gibt es noch weitere Einstellmöglichkeiten. Manche Zusatzeinstellungen für Anfänger sind erklärungsbedürftig. Fehlermeldungen sind nicht immer verständlich, was lt. Hersteller zukünftig geändert werden soll. - Mit den Updates über die letzten Jahre verbessert worden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Einführung ist notwendig, um den Aufbau des Menüs gut zu verstehen. - Der Aufbau der Bedienoberfläche könnte übersichtlicher gestaltet sein. - HMI-Display bei starker Sonneneinstrahlung schwer zu erkennen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mit den Updates über die letzten Jahre verbessert worden. - Grundsätzlich übersichtliche Bedienung. - Manche Zusatzeinstellungen erklärungsbedürftig.
Bedienungsanleitung, Benutzerhandbuch	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> - Viele Anleitungen, Listen etc. auf der Internetseite von FarmDroid (knowledge base) zu finden. - Daher auch unterwegs/auf der Fläche abrufbar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bedienungsanleitung ist vorhanden (in Papierform).
Support	<ul style="list-style-type: none"> - Zuverlässig erreichbar. - Hersteller kann sich extern auf den Roboter zuschalten und aufkommende Probleme direkt klären. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lief im Versuch über den Händler, zuverlässig. - Zum Support von FarmDroid kann keine Aussage getroffen werden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lief über den Händler und den Hersteller. - Zeitweise nicht zeitnahes Versenden von Ersatzteilen, zeitweise Schwierigkeiten bei der technischen Problemfindung durch den Hersteller.
Akku, Aufladen	<ul style="list-style-type: none"> - Aufladen an der Steckdose. - Teilw. nicht korrekte Akkuanzeige. - Tanken des Generators mit Benzin möglich, um autonome Arbeitszeit auf bis zu 26 Stunden zu verlängern. 	<ul style="list-style-type: none"> - Im Versuch vollständig autark über die PV-Module. - Alternativ Laden und Einsetzen einer Powerbank möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufladen nur an der Steckdose möglich, Akku hält etwa 8 Stunden bei reinen Hackarbeiten auf ebener Fläche.
Justieren/Austausch der Hackwerkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> - Ist gut möglich, Einstellbarkeit variabel. 	<ul style="list-style-type: none"> - Umbau vom Säen zum Hacken ist umständlich und nimmt einige Zeit in Anspruch. - Hackdrähte und Messer zwar 	<ul style="list-style-type: none"> - Einfach möglich und gut zu erreichen.

		justierbar, aber nicht sehr variabel.	
Hackgenauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Gut mit hoher Einstellmöglichkeit, wie nah an der Kulturpflanze entlanggehackt werden soll. - Robuster Aufbau und robuste Hackwerkzeuge. - Bei guter Pflanzenerkennung beste Ergebnisse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nach etwas Übung gut mit der Einstellmöglichkeit, wie nah an der Kulturpflanze entlanggehackt werden soll. - Bereiche der Kulturpflanze bleiben auch dann ungehackt, wenn dort die Kultur nicht aufgegangen ist. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hackt zwischen den Reihen, nicht in der Reihe. - Schwierigkeiten bei der Regulation hoher Beikräuter. - Hackzeitpunkt ist relevant und beeinflusst das Hackergebnis.
Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Fest verbaute aktive Hackwerkzeuge, Roboter ist nur zum Hacken geeignet. 	<ul style="list-style-type: none"> - Säen und Hacken - Das Hacken ist jedoch nur mit voriger Roboteraussaat möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vielfältige Einsatzmöglichkeiten gegeben, Hackwerkzeug kann abmontiert werden.
Lücke im Beet	<ul style="list-style-type: none"> - Kamera verliert Möglichkeit der Reihenverfolgung. Ist bei geraden Strecken kein Problem, der Roboter fährt zunächst geradeaus weiter, Spur ist eingelernt; offenbleibt, ob eine Lücke im Beet bei einem leichten Versatz der Reihe herausfordernd ist. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lücken im Beet sind kein Problem, da der FD20 ausschließlich über RTK navigiert; einziger Nachteil besteht darin, dass Fehlstellen im Beet ebenfalls von der Hacke umfahren werden, da der Roboter aufgrund des Merkmals der Saatgutablagestelle dort eine Kulturpflanze erwartet, folglich ist mehr Hackaufwand notwendig. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lücke beeinflusst nicht die Navigation, da diese ausschließlich über RTK funktioniert.

Literatur:

AIL, (Agro Innovation Lab). „Robotics Report.“ Statusbericht, 2019.

Boullard, L. Testergebnis Unkrautbekämpfung Karotte 2020. Ste Croix en Plaine, Frankreich: PLANETE Légumes, 2020.

de Silva, R., G. Cielniak, G. Wang, und J. Gao. „Deep learning-based crop row detection for infield navigation of agri-robots.“ *Journal of Field Robotics*, 2024: 41, 2299–2321.

Garford Farm Machinery Ltd. 08. 01 2025. <https://garford.com/>.

Ghobadpour, A., G. Monsalve, A. Cardenas, und H. Mousazadeh. „Off-Road Electric Vehicles and Autonomous Robots in Agricultural Sector: Trends, Challenges, and Opportunities.“ *Vehicles*, 2022: 4, 843-864.

Griepentrog, H.W., M. Norremark, H. Nielsen, und et al. „Seed Mapping of Sugar Beet.“ *Precision Agriculture*, Nr. 6 (2005): 157-165.

- Henseling, C., K. Gegner, und S. Behrendt. Autonome Feldrobotik - Einschätzungen und Anforderungen aus Sicht der Nutzer. Im Rahmen des Experimentierfeldes Agro-Nordwest. Bericht, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), 2022.
- Knoll, F.J., V. Czymmek, S. Poczihoski, T. Holtorf, und S. Hussmann. „Improving efficiency of organic farming by using a deep learning classification approach.“ *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018: 153, 347-356.
- KTBL. „Leistungs-Kostenrechnung.“ 2017: 1-6.
- Laber, H., und T.V. Krachunova. 5-Korn-Horstsaat bei Säckzweibeln interessante Alternative zur Gleichstandssaat. Versuchsbericht, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abt. Gartenbau Dresden-Pillnitz, 2020.
- Oliveira, L.F.P., A.P. Moreira, und M.F. Silva. „Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead.“ *Robotics*, 2021: 10, 52.
- Rank, H. Unkrautregulierung im Baumstreifen – Strategien ohne Glyphosat. Versuchsbericht, Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 2020.
- Savage, S., und P. Zorner. „The use of pelargonic acid as a weed management tool.“ 1996: 48: 46-47.
- Schleicher, S., und M. Gandorfer. „Digitalisierung in der Landwirtschaft: Eine Analyse der Akzeptanzhemmnisse.“ Herausgeber: A. Ruckelshausen et al. *Digitale Marktplätze und Plattformen, Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2018: 203-206.
- Spykman, O., A. Roßmadl, J. Pfrombeck, S. Kopfinger, und A. Busboom. „Wirtschaftlichkeitsbewertung eines Feldroboters auf Basis erster Erfahrungen im Praxiseinsatz.“ *Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2023: 255-264.
- Staub, S., und S. Brell. Beikrautregulierung in Ökobetrieben mit Gemüsekulturen unter besonderer Betrachtung von moderner RTK-Steuerungs-, Ultraschall- und Kameratechnik inkl. Arbeitswirtschaft und Kosten. Abschlussbericht, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), 2019.
- StMELF. Bayerisches Sonderprogramm Landwirtschaft Digital. 15. 07 2024. <https://www.stmelf.bayern.de/foerderung/bayerisches-sonderprogramm-landwirtschaft-digital-baysl/index.html> (Zugriff am 11. 02 2025).
- Zenger, X., und R. Friebe. Agrarstrukturentwicklung in Bayern - IBA-Agrarstrukturbericht 2014. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2015.

Bildnachweis: © LWG Veitshöchheim

IMPRESSUM

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)

An der Steige 15, 97209 Veitshöchheim,

Telefon +49 931 9801-0, www.lwg.bayern.de

Institut für Erwerbs- und Freizeitgartenbau (IEF), ief@lwg.bayern.de

© LWG Veitshöchheim, Nachdruck und Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers.

Stand: Februar 2025