

Mechanische Unkrautregulierung – Technik für die Praxis



DLG-Mitgliedschaft. Wir geben Wissen eine Stimme.



Jetzt Mitglied werden!

Die DLG ist seit mehr als 130 Jahren offenes Netzwerk, Wissensquelle und Impulsgeber für den Fortschritt.

Mit dem Ziel, gemeinsam mit Ihnen die Zukunft der Land-, Agrar- und Lebensmittelwirtschaft zu gestalten.

www.DLG.org/Mitgliedschaft



DLG-Merkblatt 449

Mechanische Unkrautregulierung – Technik für die Praxis

Autoren

- DLG Ausschuss für Öko-Landbau
- DLG-Ausschuss für Technik in der Pflanzenproduktion
- Prof. Karl Heinz Köller, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik
- Dr. Beat Vinzent, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft,
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
- Dr. Markus Demmel, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft,
Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Alle Informationen und Hinweise ohne jede Gewähr und Haftung

Titelbild: F. Volz, DLG

Herausgeber:

DLG e.V.
Fachzentrum Landwirtschaft
Eschborner Landstraße 122, 60489 Frankfurt am Main

1. Auflage, Stand: 11/2019

© 2019

Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder – auch für den Zweck der Unterrichtsgestaltung – nur nach vorheriger Genehmigung durch DLG e.V., Servicebereich Marketing, Eschborner Landstraße 122, 60489 Frankfurt am Main, Tel. +49 69 24788-209, M.Biallowons@DLG.org

Inhalt

1. Einführung	5
2. Mechanische Unkrautregulierung: Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen	5
2.1 Vorbeugende Maßnahmen	6
2.2 Wirkungsweisen technischer Lösungen der Unkrautregulierung	7
2.3 Ganzflächige Unkrautregulierung mit Striegeln	8
2.4 Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich	9
3. Technik für die Unkrautregulierung zwischen den Reihen	9
3.1 Scharhacke	9
3.2 Rollhacke	11
3.3 Bügelhacke	12
3.4 Trennhacke	12
3.5 Tellerhackbürste	13
3.6 Reihenfräse	13
3.7 Wirkungsgrade der Hackmaschinen	14
4. Technik für die Unkrautregulierung in der Pflanzenreihe	14
4.1 Fingerhacke	15
4.2 Torsionshacke	16
4.3 Rollstriegel	17
5. Thermische und elektrophysikalische Verfahren	17
5.1 Selektive elektronisch gesteuerte Unkrautregulierung zwischen und innerhalb der Pflanzenreihen	18
5.2 Automatische Reihenführung	19
6. Vollautomatische Hackgeräte	20
6.1 Robocrop InRow Weeder	21
6.2 Robovator	21
6.3 IC-Weeder	22
6.4 Autonome Fahrzeuge	22
7. Bewertung und Ausblick	24
8. Literatur	25

1. Einführung

In der konventionellen Landwirtschaft ist der Einsatz von Herbiziden zur Unkrautregulierung heute übliche Praxis. Sichere und termingerechte Kontrolle bei hoher Flächenleistung und weitgehende Witterungsunabhängigkeit sind die wichtigsten Vorteile. Trotzdem wird nach Alternativen gesucht. Verschärfte Zulassungsverfahren, Anwendungsbeschränkungen und Grenzwertreduzierungen begrenzen die Verwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln und fördern den Einsatz von Geräten und Verfahren zur mechanischen Unkrautkontrolle, die sich im ökologischen Landbau bewährt haben. Auch die Einführung neuer Alternativen, wie z. B. Agrarroboter oder Elektrostromtechnologien, gewinnen an Bedeutung für die Unkrautregulierung.

Ein sachgerechter Herbizideinsatz unter Beachtung relevanter gesetzlicher Vorgaben bleibt für die meisten Landwirte die bevorzugte Maßnahme zur Unkrautkontrolle. Alternative Verfahren bieten sich ergänzend an, um die Verwendung chemischer Wirkstoffe auf ein standortgemäßes Minimum zu reduzieren. Die Kombination von chemischen und mechanischen Verfahren war bereits in den 70er- und 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts im Rahmen des sogenannten integrierten Pflanzenbaues, besonders in Reihenkulturen, weit verbreitet. Heute wird der integrierte Pflanzenbau unter dem Begriff „Hybridlandwirtschaft“ erneut diskutiert.

Entscheidend für eine erfolgreiche Anwendung mechanischer Verfahren mit möglichst großer Reduktion der Unkräuter ist eine termingerechte Bekämpfung im Keimblattstadium.

Witterungs- und bodenbedingt ist der optimale Einsatzzeitraum stark begrenzt. Nur unter sehr günstigen Bedingungen wird ein der chemischen Bekämpfung vergleichbarer Erfolg erreicht. Während auf chemischem Wege Bekämpfungsraten von mehr als 90 % möglich sind, liegen sie mit Hacke und Striegel zwischen 0 und maximal etwa 70 %.

Neben der begrenzten Unkrautkontrolle fördert jeder mechanische Eingriff in den Boden den Humusabbau (verbunden mit CO₂-Emissionen) und die Erosion. Dies gilt für das Grubbern und Pflügen ebenso wie für das Eggen, und das wiederholte Hacken und Striegeln. Hinzu kommen zunehmender Arbeitszeitbedarf und Kraftstoffverbrauch.

Langjährig ökologisch arbeitende Betriebe haben für sich ein betriebsgerechtes Verfahren zur biologischen und mechanischen Unkrautkontrolle entwickelt. Deswegen wendet sich dieses Merkblatt besonders an die Landwirte, die im Sinne des integrierten Pflanzenbaues, von flächendeckendem Herbizideinsatz auf eine Kombination von chemischen und mechanischen Verfahren wechseln möchten.

Das vorliegende Merkblatt „Mechanische Unkrautregulierung – Technik für die Praxis“ stellt die verschiedenen Geräte zur mechanischen Unkrautbekämpfung vor. Eine weitere Ausgabe „Mechanische Unkrautregulierung – Strategien für die Praxis“, die derzeit in Vorbereitung ist, wird sich mit dem systematischen Einsatz der Technik beschäftigen.

2. Mechanische Unkrautregulierung: Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen

Betrachtet man die Beschreibung, Bewertung und Einordnung von Geräten und Verfahren zur mechanischen Unkrautkontrolle im Wandel der Zeit, so hat sich in den vergangenen 50 Jahren aus acker- und pflanzenbaulicher Sicht nicht grundsätzlich viel geändert. So unterscheiden sich z. B. die Aussagen von Ernst Klapp in seinem berühmten „Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaues“ (6. Auflage 1967,

Verlag Paul Parey) zur vorbeugenden Unkrautbekämpfung und zum Einsatz von Hacke und Striegel kaum von denen aktueller Publikationen.

Maßnahmen einer standortgerechten Bodenbewirtschaftung im Sinne des integrierten Pflanzenbaues zielen unter anderem darauf ab, Kulturpflanzen vor der Konkurrenz von Unkräutern zu schützen. Neben direkten Maßnahmen zur mechanischen Unkrautbekämpfung zählen hierzu Fruchtfolgegestaltung, Sortenwahl, die Wahl des Saattermins, Zwischenfrüchte und Untersaaten zur Unkrautunterdrückung, eine intensive Stoppelbearbeitung, das Pflügen sowie eine variable Saatbettbereitung. Das Bergen der Spreu beim Mähdrusch würde zudem die Verbreitung von Unkrautsamen wirkungsvoll begrenzen.

Mit den genannten, aufeinander abgestimmten Maßnahmen lässt sich die Entwicklung von Samenunkräutern unter entsprechend günstigen Witterungs- und Bodenbedingungen unterhalb ertragsrelevanter Schadschwellen regulieren. Quecken, Disteln und vergleichbare Wurzelunkräuter bleiben Herausforderungen, die nach befriedigenden Lösungen ohne Chemie suchen.

Die Gestaltung erweiterter Fruchtfolgen wird nicht nur durch die jeweiligen Standortverhältnisse bestimmt, sondern entscheidend von den ökonomischen Rahmenbedingungen und Vermarktungschancen der Fruchtarten. Hier gibt es keine Patentrezepte. Die Kenntnis fruchtartspezifischer Anforderungen an eine erfolgreiche Unkrautkontrolle, wie z. B. die Kenntnis relevanter Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen und der vorherrschenden Unkrautflora, gehören zum unabdingbaren Grundwissen des Landwirtes und sollte selbstverständlich sein.

2.1 Vorbeugende Maßnahmen

Die unkrautregulierenden Effekte verschiedener Bodenbearbeitungsgeräte sind bekannt, aber je nach Witterung und Boden nicht genau vorherzusagen und zu quantifizieren.

Ein erster Arbeitsgang mit Grubbern oder Scheibeneggen nach der Getreideernte fördert die Keimung von Unkrautsamen. Diese werden nach dem Auflaufen in einer im zeitlichen Abstand folgenden Überfahrt beseitigt. Bedingt durch den mischenden Arbeitseffekt der Werkzeuge werden die Unkrautsamen jedoch über den Bearbeitungshorizont verteilt. Das führt dazu, dass nicht alle keimen und die unkrautunterdrückende Wirkung insgesamt vergleichsweise gering ist. Die genannten Arbeitsgänge lassen sich zwar mehrfach wiederholen, aber der damit verbundene Mehraufwand bleibt kritisch mit möglichen ökonomischen und ökologischen Nachteilen zu prüfen und die Durchführung abzuwägen. Ein besonderer Vorteil mehrfachen Grubbens ist die Bekämpfung von Quecken.

Die unkrautthemmende Wirkung des Pflügens hängt ab von den physiologischen Eigenschaften der Unkrautarten. Die überwiegend flach keimenden Arten werden durch das Vergraben erfolgreich beseitigt. Jedoch verteilt das Pflügen sämtliche Samen über den gesamten Pflughorizont, weshalb ein langfristiger Bekämpfungserfolg abhängig von der Überlebensdauer der Unkrautart ist. Das Keimen von Samen mit kurzer Lebensdauer (z. B. Trespen) lässt sich durch Vergraben nachhaltig unterdrücken.

Unkräuter mit mehrjähriger Keimruhe, werden durch wiederholtes Pflügen wieder nach oben gefördert und in Keimstimmung gebracht. Wurzelunkräuter, wie z. B. Quecke, Distel und Ackerwinde, werden durch das Pflügen wirksam gehemmt. Das Randpflügen zur Begrenzung des Einwachsens von Schadgräsern ist in vielen Betrieben eine Standardmaßnahme. Festzuhalten bleibt auch hier, dass die möglichen positiven Effekte des Pflügens entscheidend bestimmt werden durch die jeweiligen Standortbedingungen. Die Entscheidung für das Pflügen ist abzuwägen mit dem entsprechenden Zeit- und Kostenaufwand und dem erhöhten Risiko von Bodenerosion.

Auch die Saatbettbereitung bietet unter günstigen Bedingungen Möglichkeiten zur Unkrautregulierung. So können durch einen vorgezogenen Arbeitsgang vor der eigentlichen Saatbettbereitung und Saat Unkrautsamen (z. B. Ackerfuchsschwanz) zur Keimung angeregt und durch die folgende Maßnahme vernichtet werden. Voraussetzung ist, dass Bodenfeuchte, Temperatur und Keimverhalten der Samen den Bekämpfungserfolg zulassen.

Wirkungsvolle Möglichkeiten zur Unkrautunterdrückung bieten Zwischenfrüchte und Untersaaten. Die Voraussetzung sind flächendeckende und dichte Bestände. Dies bestätigen auch Erfahrungen von Landwirten, die seit Jahren konsequent auf das Pflügen verzichten und dennoch einen signifikant reduzierten Herbizideinsatz erreichen.

Je nach Boden, Witterung und Pflanzenart lassen sich die genannten Voraussetzungen nicht in jedem Jahr erfüllen. Das extrem trockene Jahr 2018 hat Grenzen aufgezeigt, nicht nur für die Etablierung von Zwischenfruchtbeständen, sondern für sämtliche der genannten Maßnahmen. Denn deren Erfolg hängen entscheidend von den jeweiligen Standortbedingungen (Boden, Witterung, Fruchtfolge) ab. Ein konventionell wirtschaftender Landwirt wird diese Restriktionen im Vergleich zu einem Herbizideinsatz betrachten und unter Beachtung ertragsrelevanter Kriterien über seinen Maßnahmenmix entscheiden. Jedoch ist unter extremer Trockenheit häufig weder ein mechanischer, noch ein chemischer Eingriff zur Unkrautkontrolle erforderlich.



Abbildung 1: Flächendeckende, dichte Untersaaten-Bestände unterdrücken Unkräuter erfolgreich (Foto: landpixel)

Je nach Boden, Witterung und Pflanzenart lassen sich die genannten Voraussetzungen nicht in jedem Jahr erfüllen. Das extrem trockene Jahr 2018 hat Grenzen aufgezeigt, nicht nur für die Etablierung von Zwischenfruchtbeständen, sondern für sämtliche der genannten Maßnahmen. Denn deren Erfolg hängen entscheidend von den jeweiligen Standortbedingungen (Boden, Witterung, Fruchtfolge) ab. Ein konventionell wirtschaftender Landwirt wird diese Restriktionen im Vergleich zu einem Herbizideinsatz betrachten und unter Beachtung ertragsrelevanter Kriterien über seinen Maßnahmenmix entscheiden. Jedoch ist unter extremer Trockenheit häufig weder ein mechanischer, noch ein chemischer Eingriff zur Unkrautkontrolle erforderlich.

2.2 Wirkungsweisen technischer Lösungen der Unkrautregulierung

Striegel und Hacken, jeweils in einer Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen, sind die wichtigsten Gerätegruppen zur mechanischen Unkrautkontrolle. Hauptanwendungsgebiet des Striegels ist der ganzflächige Einsatz im Getreide, während die Hacken insbesondere in Reihenkulturen genutzt werden.

Unabhängig von der Wahl des Gerätes oder einer bestimmtem Werkzeugform ist ein ausreichender Bekämpfungserfolg an bestimmte Voraussetzungen gebunden. Entscheidend ist das jeweilige Entwicklungsstadium des Unkrautes und der Kulturpflanze. Die **Striegelwirkung** beruht überwiegend auf dem Verschütten der Unkrautkeimlinge und dem Herausreißen der Keimpflanzen. Der beste Bekämpfungserfolg wird im Keimblattstadium erreicht. Ein Vorauflaufstriegeln (Blindstriegeln) ist bei Getreide bis zum „Spitzen“ möglich, Nachauflaufbehandlungen erst ab dem Dreiblattstadium. Ein gleichmäßiger Feldaufgang, trockener und feinkrümlicher Boden und hohe Arbeitsgeschwindigkeit erhöhen die Striegelwirkung und mindern das Risiko von Beschädigungen und Verlusten der Kulturpflanzen, die unterschiedlich empfindlich auf diese Maßnahme reagieren. So reagiert Weizen z. B. weniger als stark bestockende Wintergerste. Je nach Unkrautart und Besatz wird nach mehrmaligem Striegeln durchschnittlich ein Wirkungsgrad von etwa 50 % erzielt.

Zur Unkrautkontrolle in Reihenkulturen sind **Hackgeräte** bevorzugte Wahl. Auch hier ist der Erfolg abhängig von den Witterungs- und Bodenbedingungen. Besonders zu beachten ist das Entwicklungs-

stadium der Kulturpflanze, um mechanische Beschädigungen durch Hackwerkzeuge zu vermeiden. Wegen seiner flachen Wurzel Ausbildung reagiert z. B. Mais sehr empfindlich, so dass je nach Stadium unterschiedliche Mindestabstände zur Maisreihe einzuhalten sind.

Eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeugformen und -kombinationen gestattet eine optimale Anpassung an gegebene Bedingungen mit möglichst hohem Bekämpfungserfolg durch Verschütten und Herausreißen der Unkräuter. Üblicherweise wird der Bekämpfungserfolg in mehreren Arbeitsgängen erreicht. Trotzdem bleibt das Problem der Restverunkrautung in direkter Nähe der Kulturpflanzen und in der Reihe. Die Bekämpfung derartig platzierter Unkräuter erfordert den Einsatz spezieller Geräte. Während Samenunkräuter durch wiederholtes Hacken unter Kontrolle gehalten werden können, lassen sich Wurzelunkräuter, wie z. B. Disteln, auch durch mehrmaligen Einsatz nicht dauerhaft beseitigen.

Mit großen Arbeitsbreiten, hohen Fahrgeschwindigkeiten, GPS-Steuerung und Sensortechnik versucht man, den Einsatz von Striegeln und Hackmaschinen effektiver zu gestalten. Entsprechende Entwicklungen werden folgend detailliert vorgestellt.

2.3 Ganzflächige Unkrautregulierung mit Striegeln

Größte Verbreitung haben sogenannte Zinkenstriegel mit Arbeitsbreiten bis zu 27 m. Die jeweils etwa 1,5 m breiten Zinkenfelder sind gelenkig am Geräterahmen befestigt, um eine optimale Bodenanpassung zu ermöglichen. Der ganzflächige Einsatz differenziert nicht zwischen Kulturpflanze und Unkraut, so dass die Geräteeinstellung möglichst exakt auf die jeweiligen Bodenbedingungen und Entwicklungsstadien der Pflanzen abzustimmen ist. Die Anwendung beim „Spitzen“ des Getreides ist möglich, aber das Ausmaß an Pflanzenverlusten schwer einzuschätzen. Gleichzeitig ist die Wirkung gegen die Unkräuter unter guten Bedingungen zu diesem Zeitpunkt am höchsten, da sich die meisten Samenpflanzen im empfindlichen Fadenstadium befinden. Ab dem 3-Blattstadium gilt Getreide als robust, aber zu diesem Zeitpunkt sind die Unkräuter oft so stark entwickelt, dass sie nur schwer zu entfernen sind.

Beim Voraufaufeinsatz in Leguminosen ist auf eine ausreichend und gleichmäßig tiefe Saatablage zu achten. Je nach Entwicklungsstadium reagiert besonders Soja mit hohen Pflanzenverlusten. Die Wirkungsweise von Striegelzinken beruht auf der Formung von V-förmigen Rillen mit seitlichem Bodentransport (bei einer Vorfahrtgeschwindigkeit von 8 km/h von etwa 20 cm nach beiden Seiten) und damit verbundenem Ausreißen und Verschütten der Unkräuter.



Abbildung 2: Zinkenstriegel eignen sich für den ganzflächigen Einsatz (Foto: Horsch Maschinen GmbH)



Abbildung 3: Striegelsysteme sind aufgrund parallelogrammgeführter Hebelsysteme an den jeweiligen Standort anpassungsfähig (Foto: Horsch Maschinen GmbH)

Unterschiedliche Federsysteme ermöglichen eine den jeweiligen Bodenbedingungen angepassten Zinkendruck, so dass auch auf harten Böden eine ausreichende Kraftübertragung auf die Zinkenspitze ermöglicht wird. Auf stark verkrusteten, tonigen Böden kommt das System an seine Grenzen, wenn von den Zinken nicht mehr ausreichend Boden losgerissen und bewegt werden kann.

Spezielle Hebelsysteme und Parallelogrammführungen gewährleisten eine gleichmäßige Zinkenbelastung sämtlicher Striegelelemente. Dies führt zu einem anpassungsfähigen Striegelsystem, das sich auch in Dammkulturen verwenden lässt. Einige Hersteller bieten eine zentrale hydraulische Druckverstellung und einen hydraulischen Druckausgleich sämtlicher Zinkenfelder über die gesamte Arbeitsbreite an. Stütz- oder Tasträder sind zusätzliche Elemente zur Verbesserung der Bodenanpassung.

Die Zinkenlänge liegt überwiegend zwischen 50 und 60 cm, der Zinkendurchmesser zwischen 6 und 8 mm, die Strichabstände variieren zwischen 25 und 40 mm. Die Neigung der Zinken beträgt 30°–45°, gekröpfte Zinkenenden stehen dann etwa senkrecht zur Bodenoberfläche. Ein 1,5 m breites Striegelelement ist mit etwa 60 in 5 oder 6 Reihen angeordneten Zinken ausgerüstet und erfordert einen Motorleistungsbedarf von etwa 11 KW/15 PS. Arbeitsgeschwindigkeiten von 5 bis >10km/h sind möglich.

Der Wirkungsgrad beim Einsatz von Striegeln liegt selten über 70%. Mit Kulturpflanzenverlusten von 5–10% ist zu rechnen.

2.4 Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich

Im Zuckerrüben- und Maisanbau ist die mechanische Unkrautregulierung zwischen den Pflanzenreihen weit verbreitet, darüber hinaus besonders im Gemüseanbau mit zahlreichen Sonderlösungen. Die wichtigsten Anforderungen an moderne Hacktechnik sind:

- hoher Unkrautregulierungsgrad
- geringe Kulturpflanzenverluste
- geringe Abstände zur Kulturpflanzenreihe
- exakte Geräteführung
- hohe Flächenleistung
- Fahrerentlastung.

Ein umfangreiches Angebot an Maschinen und Geräten mit gezogenen und angetriebenen Werkzeugen ist auf dem Markt verfügbar. Die größte Verbreitung haben Scharhacken, daneben Roll-, Bügel-, Trenn- und Bürstenhacken sowie Reihenfräsen. Sie werden folgend vorgestellt.

3. Technik für die Unkrautregulierung zwischen den Reihen

3.1 Scharhacke

Die in ihrem Funktionsprinzip älteste und bis heute am meisten eingesetzte Maschine ist die Scharhacke. Ihr einfacher Aufbau, ihre Robustheit und im Vergleich zu anderen Verfahren der mechanischen Unkrautregulierung kostengünstige Anschaffung begründet diesen Erfolg.

Sie ist variabel für alle Reihenweiten verwendbar und eignet sich zur Bekämpfung der Unkräuter in einem großen Wachstumsspektrum. Zur präzisen Steuerung der Maschine und bei großen Arbeitsbreiten ist es notwendig, die Maschine entweder manuell durch eine zweite Arbeitskraft zu führen oder mit sensorbasierten Reihenführungssystemen auszustatten. Die manuelle Steuerung erfolgt je nach An-

bieter über die hydraulische Ansteuerung zweier Lenkräder oder mittels eines Verschieberahmens. Zur Kostenersparnis der zweiten Arbeitskraft und der Realisierung höherer Fahrgeschwindigkeiten besteht die Möglichkeit, die Scharhacke mit sensorbasierten Reihenführungssystemen zu kombinieren. Diese Lösungen wurden in den vergangenen Jahren zur Marktreife gebracht. Sie werden im Abschnitt „Reihenführung“ näher beschrieben.

Scharhacken lassen sich mit unterschiedlichen Zinkenformen und Hackwerkzeugen ausstatten.

Als Zinkenformen stehen starre, gefederte oder eine Kombination beider, sogenannte „Vibromesser“, zur Verfügung. In Reihenkulturen mit 45 cm oder 50 cm Reihenweiten werden in der Regel drei Werkzeuge zur Bearbeitung der Zwischenreihe an einem Parallelogramm montiert. Die Auswahl der Hackschare richtet sich nach dem Entwicklungsstadium der Kulturpflanze. Überwiegend werden drei verschiedene Grund-Scharformen verwendet:

- das Standardschar,
- das L-Schar und
- das Gänsefußschar.

Das Standardhackschar, wegen der dreieckigen Form auch A-Schar genannt, und das L-Schar, auch als Winkelmesser bezeichnet, eignen sich bereits für den Einsatz in frühen Entwicklungsstadien der Kulturpflanze. Für Kulturen mit geringeren Reihenweiten stehen modifizierte Standardhackschare zur Verfügung.

Das Gänsefußschar wirft aufgrund der kurzen Schnittfläche mehr Erde auf und wird normalerweise als mittleres der Hackschare zur Bearbeitung einer Zwischenreihe eingesetzt. Eine Klassifizierung der Schare kann anhand der Größe, des Schnittwinkels und des Anstellwinkels erfolgen. Die Größe bezeichnet die Scharbreite, der Schnittwinkel ist die Winkeldifferenz zu einer orthogonal angelegten Linie zur Bearbeitungsrichtung und ist entscheidend für die Schnittwirkung und die Selbstreinigung des Schares und den Zugkraftbedarf. Beim Standardhackschar beträgt der Schnittwinkel zwischen 30° und 50°. Der Anstellwinkel des Schares zum Boden entscheidet über die Schnittqualität und die Menge an aufgeworfener Erde. Ein flacher Anstellwinkel sorgt für ein sauberes Schnittbild und geringen Erdaufwurf.

Eine Möglichkeit näher an der Kulturpflanzenreihe zu arbeiten, ist der Einsatz des Winkelmessers mit gekröpftem Stil. Zur Erhöhung des Unkrautregulierungseffektes besteht die Möglichkeit, die Hackschare mit verschiedenen Zusatzgeräten zu kombinieren. Möglich ist bspw. die Kombination mit Reihenriegeln, die den Wende- und Mischeffekt deutlich verstärken und das Austrocknen und Absterben



Abbildung 4: Scharhacken eignen sich zur Unkrautbekämpfung in unterschiedlichen Wachstumsstadien (Foto: Schmotzer Hacktechnik GmbH)



Abbildung 5: Scharhacke (Foto: Schmotzer Hacktechnik GmbH)

der Unkräuter beschleunigen. Je nach Bodenzustand liegt die Arbeitsgeschwindigkeit zwischen 6–10 km/h. Die große Rahmenhöhe der Geräte erlaubt eine Unkrautbekämpfung bis zu einer Pflanzhöhe von 70 cm. Die parallelogrammgeführten Hackgruppen werden über Tasträder in der Tiefe geführt. Zum Schutz der Kulturpflanzen, besonders im jungen Entwicklungsstadium, werden Scheibenseche oder Seitenbleche verwendet. Diese verhindern ein Verschütten der Pflanzen durch die aufgeworfene Erde.

Auf leichten bis mittleren Böden wird bei kleineren und mittleren Samenunkräutern ein guter Bekämpfungserfolg erzielt. Große Samenunkräuter und tief wurzelnde Unkräuter (z. B. Disteln, Quecken) werden kaum beeinträchtigt. Um Wurzelverletzungen an Kulturpflanzen zu vermeiden muss ein unbearbeiteter Sicherheitsstreifen verbleiben. Dies ist verbunden mit unvermeidlicher Restverunkrautung.

3.2 Rollhacke

Rollhacken verfügen über schräg zur Bearbeitungsrichtung angeordnete, bodenangetriebene, rotierende Hacksterne mit stufenlos einstellbarer Schrägstellung (Anstellwinkel) der Werkzeuge.

Sie werden in unterschiedlichen Ausführungen angeboten. Eine ganzflächige und reihenunabhängige Arbeit ist ebenso möglich wie ein Einsatz im Zwischenreihenbereich. In diesem Fall lässt sich, je nach Einstellung, Erde weg von der Pflanzenreihe oder hin zur Pflanzenreihe (anhäufeln) transportieren. Je nach Reihenweite werden für Mais, Rüben und Getreide Ausführungen bis zu 32 Reihen angeboten.

Bei der sogenannten „Rotary Hoe“ besitzt jedes Hackrad einen Durchmesser von 52 cm. An diesem sind 16 selbstschärfende, auswechselbare Zinken befestigt. Der gute und schonende unkrautregulierende Effekt wird über das Ende jedes Zinkens erzielt. Dieser ist an der Spitze gebogen und löffelartig ausgeformt. Der Zinken sticht bei der rotierenden Bewegung in Fahrtrichtung senkrecht in den Boden ein, wodurch keine Verschiebung der Bodenoberfläche stattfindet. Nach dem Einstich in den Boden verändert die Spitze des Zinkens ihre Position und tritt horizontal aus dem Boden aus. Eine kleine Menge Erde und aufgelaufener Unkräuter verbleibt in der Vertiefung der Zinkenspitze und wird durch die Rotationsbewegung abgeworfen. Aufgrund der unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeiten von Erde und Unkräuter werden letztere auf der Bodenoberfläche abgelegt und vertrocknen.

Konstruktionsbedingt erfolgt die Tiefenführung jedes Elementes allein über die „Hackräder“.

Je höher die Vorfahrtgeschwindigkeit, desto geringer ist die Arbeitstiefe. Deshalb ist es möglich die Rotorhacke im Voraufbau einzusetzen.



Abbildung 6: Rollhacken sind ganzflächig und im Zwischenreihenbereich einsetzbar (Foto: Thomas Hatzenbichler Agro-Technik GmbH)



Abbildung 7: Rotary Hoe (Foto: Yetter farm equipment)

Hierbei ist auf eine ausreichend tiefe Saatgutablage zu achten. Eine gute Unkrautregulierung wird nur im Fädchen- und Keimblattstadium erreicht. Vorteilhaft sind die vergleichsweise geringen Kulturpflanzenverluste. Hervorzuheben sind neben der hohen Flächenleistung, bei Arbeitsgeschwindigkeiten von 12–20 km/h, die störungsfreie Arbeit auf Mulchsaatflächen sowie der geringe Einstellaufwand.

3.3 Bügelhacke

Die Bügelhacke ist seit 1995 auf dem Markt und verfügt über bodenangetriebene Werkzeuge. Ihr Funktionsprinzip entspricht dem von Drahtkrümelwalzen als Nachläufer von Saatbettkombinationen. Zwei Reihen von Bügelkörben sind am Rahmen befestigt und über einen Kettenantrieb verbunden.

Die hinteren Bügelkörbe arbeiten im Übersetzungsverhältnis 1:2 schneller als die vorderen Körbe, wodurch der spezielle Bearbeitungseffekt entsteht. Die erste, langsamer arbeitende Korbreihe bricht den Boden auf, die zweite zieht das Unkraut aus dem gelockerten Boden und legt es auf der Bodenoberfläche ab. Kleine Unkräuter und Keimfäden bleiben an den Bügelkörben hängen und werden aus dem Boden gezogen.

Die Breite der Bügelkörbe richtet sich nach den vorhandenen Reihenabständen. Die Bügelhacke reguliert kleine Unkräuter auf leichten und lockeren Böden unter ausreichend feuchten Bedingungen mit einer Arbeitstiefe von 2–4 cm. Sie wirft keine Erde in die Reihe, so dass ein sehr frühzeitiger Einsatz möglich ist, allerdings können keine großen Unkräuter entfernt werden. Der Einsatz der Bügelhacke wird oft in Verbindung mit Standardhackscharen zur Bodenvorlockerung verwendet, um das Einsatzspektrum zu erweitern.



Abbildung 8: Bügelhacken lockern im ersten Schritt den Boden und ziehen Unkräuter aus dem Boden heraus (Foto: Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH)



Abbildung 9: Detailansicht der Bügelhacke (Foto: Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH)

3.4 Trennhacke

Die Trennhacke besteht aus einer Kombination von Hackscharen und hydraulisch angetriebenen Rotorstriegeln. Der von einem Gänsefußschar angehobene und gelockerte Erdbalken wird von einem Rotorstriegelement bearbeitet und separiert dabei die Unkräuter vom Boden, die auf der Bodenoberfläche zurückbleiben und vertrocknen. Die Bearbeitungsintensität lässt sich durch die Arbeitsgeschwindigkeit und die Drehzahl der Rotoren variieren. Da sich sämtliche Rotorelemente auf einer durchgehenden Antriebswelle befinden, ist eine möglichst ebene Bodenoberfläche Voraussetzung für eine gleichmäßige Arbeitstiefe. Diese Hacke ist in zahlreichen Kulturen problemlos einzusetzen und ermöglicht einen vergleichsweise guten Regulierungserfolg.

3.5 Tellerhackbürste

Die systematische Einteilung unkrautregulierender Maschinen nach dem bearbeiteten Raum bewirkt, dass einige Maschinen nicht eindeutig dem Zwischenreihenbereich oder der Bearbeitung innerhalb der Pflanzenreihe zugeordnet werden können. Dies gilt z. B. für die Tellerhackbürste. Der Unkrautregulierungserfolg innerhalb der Pflanzenreihe beruht hier vorwiegend auf dem Verschütten der Unkräuter durch Werkzeuge, die im Zwischenreihenbereich arbeiten und Erde in die Reihe hineinhäufeln oder -bürsten. Der Einsatz der Geräte ist allerdings auf einen späteren Einsatzzeitpunkt in der Kulturpflanzenentwicklung beschränkt. Die Kulturpflanze benötigt einen deutlichen Wachstumsvorsprung vor dem Unkraut, damit keine Ertragsdepressionen eintreten.

Die Tellerhackbürste arbeitet mit Bürsten, die an einem vertikalen Schaft angebracht sind. Jede Bürste wird über einen separaten Hydraulikmotor angetrieben. Zum Einsatz auch mit kleineren Traktoren ist an dem Gerät eine Hydraulikpumpe montiert, die mittels Gelenkwelle vom Traktor angetrieben wird. Die Bürsten mit einem Durchmesser von jeweils 15–20 cm bestehen überwiegend aus 1–3 mm starken und 15 cm langen Polypropylen-Borsten, die in einem Winkel von ca. 30° nach außen stehen. Einstellparameter der Tellerhackbürste sind Drehrichtung und Umfanggeschwindigkeit der Bürsten, ihr Anstellwinkel quer zur Fahrtrichtung (10–20°) sowie der Abstand zweier Bürsten in der Reihe. In Verbindung mit der Vorfahrtgeschwindigkeit (ca. 1 km/h) bestimmen sie die Arbeitsintensität und den Unkrautregulierungserfolg.



Abbildung 10: Tellerhackbürsten bekämpfen Unkräuter durch verschütten (Foto: Dr. Kolbe)

Die Bürsten bewirken entweder Herausziehen des Unkrautes aus dem Boden, eine Entblätterung, den Bruch des Sprosses oder eine Verletzung der Wurzeln. Für das Verschütten der Unkräuter haben neben der Rotationsrichtung der Bürsten auch die Arbeitstiefe und die Bodenfeuchte großen Einfluss. Unter trockenen Bedingungen kann die Bürste nicht in den Boden eindringen. Es kommt zu einer starken Staubentwicklung und die Arbeitsqualität sinkt deutlich ab. Der Einsatz der Tellerhackbürste spielt aufgrund der hohen Anschaffungskosten und geringen Arbeitsgeschwindigkeit in Flächenkulturen wie Mais und Zuckerrüben keine Rolle. Ausgerüstet mit entsprechend starken Kunststoff- oder Stahlborsten eignen sich Tellerhackbürsten bevorzugt für das Entfernen von Unkraut aus Fugen auf Pflaster- und Schotterflächen.

3.6 Reihenfräse

Zapfwellengetriebene Geräte wie die Hackbürsten oder Reihenfräsen werden überwiegend im Gemüsebau eingesetzt. Hohe Anschaffungspreise, geringe Flächenleistung und die intensive Bearbeitung, verbunden mit dem Risiko von Verschlammung und Erosion, sprechen gegen ihre Verwendung in Flächenkulturen wie Mais und Rüben.

Grundsätzlich werden bei den Fräsen zwei Bauformen unterschieden: einerseits eine normale, ganzflächig arbeitende Fräse, bei der lediglich im Abstand der Pflanzenreihen die Fräsmesser entfernt werden. Andererseits speziell für Reihenkulturen entwickelte Geräte. Hier sind einzelne Fräselemente, entspre-

chend dem Reihenabstand, am Geräterahmen befestigt. Der Antrieb erfolgt üblicherweise über eine zentrale Welle, von der jedes Fräselement über einen separaten Kettenantrieb angetrieben wird.

Die Arbeitsintensität und damit der Regulierungserfolg werden bestimmt durch die Vorfahrtsgeschwindigkeit, die Anzahl der Fräsmesser und die Umfangsgeschwindigkeit des Messerkranzes. Die intensive Zerkleinerungswirkung kann unter entsprechenden Boden- und Witterungsbedingungen zu massiver Verschlämmung und Erosion des Bodens führen. Die unabhängige, gefederte Aufhängung der Fräskörper ermöglicht eine gleichmäßige Boden Anpassung. Die Eignung der Bodenfräse zur Unkrautregulierung ist gut. Durch die aktiv angetriebenen L-förmigen Fräsmesser wird der Boden abgeschnitten und intensiv durchmischt. Die Schutzeinrichtungen an der Reihenfräse gewährleisten eine exakte Randbegrenzung zur Kulturpflanzenreihe. Somit ist sie sehr frühzeitig ab dem Sichtbarwerden der Kulturpflanzenreihe einsetzbar.

Reihenfräsen eignen sich auch zur Regulierung von sehr großen Unkräutern, da diese erst von der Wurzel getrennt, nochmals zerkleinert und schließlich in den Boden eingearbeitet werden.

3.7 Wirkungsgrade der Hackmaschinen

Bei vergleichender Betrachtung der genannten Hackmaschinen für die Bearbeitung des Zwischenreihenbereiches bleibt festzuhalten, dass sich Schar-, Roll-, Bügel- und Trennhacken, unter Beachtung der jeweils relevanten Rahmenbedingungen, mit Unkrautregulierungserfolgen von 80–90 % (bezogen auf die Ausgangsverunkrautung) bewährt haben. Dies gilt für Schar- und Rollhacken in sämtlichen Unkrautentwicklungsstadien vom Keimblatt- bis über das 4-Blattstadium hinaus, für Bügelhacken und Hackbürsten bevorzugt im Keimblattstadium. Bezogen auf das Wachstumsstadium der Kulturpflanzen (z. B. Zuckerrüben) lassen sich Scharhacken wegen der vielfältigen Messerformen und Einstellmöglichkeiten erfolgreich ohne Einschränkungen einsetzen. Bei den übrigen Geräten gibt es gewisse Restriktionen bezüglich des Sicherheitsabstandes zur Kulturpflanzenreihe.

Für den Einsatz auf Mulchsaatflächen empfehlen sich von den genannten Lösungen nur Rollhacken für eine störungsfreie Arbeit. Darüber hinaus bieten sich hierzu spezielle Werkzeuge, wie z. B. die sogenannte Scheiben- oder Tellerhacke an. Frei drehbar gelagerte, waagrecht angeordnete, nicht aktiv angetriebene Scheiben ziehen sich in den Boden, werden durch die angreifenden Kräfte in Rotation versetzt und trennen nach dem Prinzip des „ziehenden Schnittes“ die Unkräuter von den Wurzeln. Auf diese Weise werden die Unkräuter im Zwischenreihenbereich ganzflächig und flach abgeschnitten.

4. Technik für die Unkrautregulierung in der Pflanzenreihe

Eine effektive und nachhaltig wirkende maschinelle Unkrautregulierung innerhalb der Pflanzenreihe ist sehr schwierig. Der derzeit verfügbaren Technik für die Bearbeitung des Raumes innerhalb der Pflanzenreihe sind aufgrund der nicht selektiven Arbeitsweise enge Grenzen gesetzt. Die nicht erfol-



Abbildung 11: Fräsen für Reihenkulturen zeichnen sich durch intensive Zerkleinerungswirkung aus und erreichen eine gute Unkrautregulierung (Foto: breviglieri)

gende Unterscheidung zwischen Kulturpflanze und Unkraut erlaubt nur ein sehr begrenztes, wirksames Einsatzspektrum. Für eine den Anforderungen entsprechende, zufriedenstellende Arbeitsqualität ist ein Wachstumsunterschied zwischen Kulturpflanze und Unkraut Voraussetzung. Ist dies zu Gunsten der Kulturpflanze nicht mehr gegeben, können die Werkzeuge keine ausreichende Unkrautregulierung mehr vornehmen, da die Haltekraft des Unkrautes größer als die der Kulturpflanze ist.

Eine maschinelle Reduzierung des Unkrautes innerhalb der Pflanzenreihe ist aber z. B. im Biorübenanbau unbedingt erforderlich. Ohne maschinelle Reduzierung des Unkrautes in der Pflanzenreihe besteht weiterhin ein sehr hoher Arbeitszeitbedarf für die notwendige Handarbeit. Die maschinelle Reduzierung des Unkrautes im frühen Wachstumsstadium der Zuckerrübe ermöglicht einen deutlich geringeren Aufwand an Handarbeit. Ist ein Anteil der Unkräuter im Pflanzenzwischenraum maschinell entfernt, kann der Einsatz der Handarbeit in einer engeren Zeitspanne und mit weniger Kosten erfolgen. Die zeitnahe Ergänzung der maschinellen Unkrautregulierung durch die Handarbeit ermöglicht den Zuckerrüben einen wichtigen Wachstumsvorsprung.

Zur Steigerung des Wirkungsgrades der mechanischen Unkrautkontrolle empfiehlt sich die Kombination von Geräten zur Zwischenreihenbearbeitung mit Werkzeugen, die in die Kulturpflanzenreihe greifen. Geeignet sind z. B. die Finger- oder Torsionshacke oder der Einsatz von Rollstriegeln, die über die gesamte Arbeitsbreite wirken.

4.1 Fingerhacke

Fingerhackelemente zur Unkrautregulierung in der Pflanzenreihe werden überwiegend mit einer Scharhacke kombiniert. Ein Hackaggregat setzt sich aus zwei Hackelementen zusammen. Ein Hackelement besteht aus zwei Hackkörpern, der Hackkörper aus einer drehbar gelagerten Scheibe, die radial mit abwechselnd starren und flexiblen Werkzeugen ausgestattet ist. Insgesamt sind 32 Werkzeuge pro Fingerscheibe montiert. Der Bodenantrieb erfolgt über starre Metallzinken, welche in halbaxialer Richtung am Scheibenumfang, senkrecht zum Boden, angebracht sind. Sie arbeiten senkrecht im Boden. Von jeder Seite greifen die flexiblen Werkzeuge in die Pflanzenreihe ein. Die starren Werkzeuge bearbeiten den Boden in der Peripherie der Wurzel. In Fahrtrichtung sind die Scheiben in der Horizontalposition der Scheibenachse um 30° angestellt. Um den gewünschten Arbeitseffekt zu erzielen ist es erforderlich, dass die Antriebszinken tiefer in den Boden eingreifen als die starren Hackwerkzeuge. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Scheiben über die Zinken angetrieben werden und ein Hackeffekt erzielt wird.



Abbildung 12: Fingerhacke (Foto: Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH)



Abbildung 13: Fingerhacke in der Detailansicht (Foto: Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH)

Das jeweilige Stadium der Kulturpflanze bestimmt die Wahl der flexiblen Werkzeuge und ihre Einstellung. Optimal einsetzbar ist die Maschine nur dann, wenn die Kulturpflanze einen deutlichen Vorsprung zum Unkraut aufweist. Behandlungseffekte bis zu 80% sind möglich. Die Hackwirkung beruht auf der horizontalen Scherwirkung der flexiblen Werkzeuge im Boden. Unterstützt wird dies durch die tief in den Boden eingreifenden, vorlaufenden starren Werkzeuge.

Für die Funktion der Hacke sind die jeweiligen Radien der Werkzeuge und der Antriebszinken ausschlaggebend. Aus der Differenz der Radien resultiert der abscherende und im Boden kratzende Arbeitseffekt der Fingerhacke. Vorteile sind der kombinierte Einsatz der Bearbeitung zwischen und in der Reihe, ihr vielfältiger Einsatz in Flächen- und Intensivkulturen mit guten Unkrautregulierungsraten, bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von etwa 6 km/h und einer Arbeitstiefe von etwa 4 cm. Auf trockenen Böden ist die Wirkung eingeschränkt. Mittlere und große Samen und Kräuter sowie Wurzelunkräuter lassen sich nicht bekämpfen. Der hohe Einstellaufwand und relativ hohe Anschaffungskosten pro Reihe sind bei vergleichender Betrachtung alternativer Lösungen zu beachten.

4.2 Torsionshacke

Torsionshackelemente werden an den Hackkörpern einer zwischen den Reihen arbeitenden Hackmaschine befestigt und besitzen einen sehr einfachen Aufbau. Zwei im Winkel von 30° nach hinten gebogenen Federzinken, deren Enden zur Reihe hin gebogen sind, laufen links und rechts von der Pflanzenreihe und entfernen die Unkräuter. Die Federzinken arbeiten schleppend und entwickeln mit zunehmender Arbeitsgeschwindigkeit eine Eigenvibration. Dadurch arbeitet die Torsionshacke ca. 20 mm tief im Boden. Wichtig hierfür ist ein möglichst steinfreier Boden mit wenig Mulchmaterial. Der Abstand der Federzinken kann

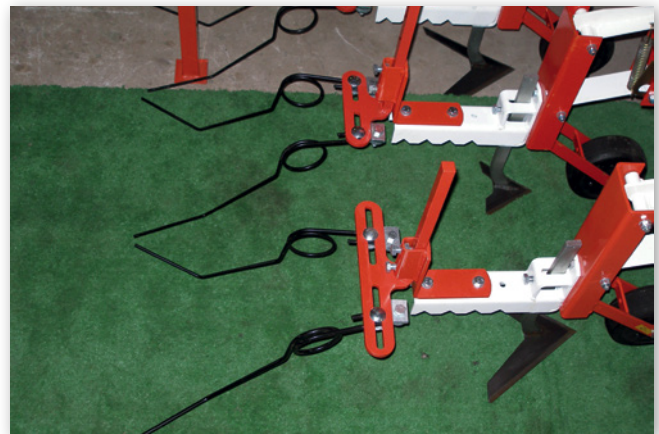


Abbildung 14: Der Federabstand der Torsionshacken kann an die bearbeiteten Kulturen angepasst werden (Foto: Frato)

je nach Wachstumsstadium der Kulturpflanze verändert werden. Je robuster die Pflanze, desto enger ist der Abstand zwischen den Federzinken wählbar.

Im Zuckerrübenanbau werden die Federzinken im frühen Entwicklungsstadium der Rübe mit einem Abstand von 3–5 cm eingesetzt. Nach Versuchsergebnissen liegt der Unkrautregulierungsgrad im 8–10 Blatt Stadium der Zuckerrüben bei kleinen Unkräutern bei über 80%, bei größeren Unkräutern bei 33%, der Verlust an Zuckerrüben bei 5%. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass unter feuchten Bodenverhältnissen viele Unkräuter erneut anwachsen. Auf sandigen Böden ist der Unkrautregulierungsgrad stets besser als auf tonigen Böden. Unter trockenen Verhältnissen dringen die Federzinken nicht ausreichend in den Boden. Der Regulierungserfolg der Torsionshacke hängt ab vom Wachstumsunterschied zwischen der Kulturpflanze und dem Unkraut. Aus diesem Grund erzielt sie in gepflanzten Kulturen, aufgrund der besseren Etablierung der Kultur, bessere Unkrautregulierungsgrade als in gesäten Kulturen.

Guter Regulierungserfolg auf sandigen und lockeren Böden sowie hohe Kulturverträglichkeit, einfache Einstellung und vergleichsweise geringe Anschaffungskosten sind die wichtigsten Vorteile der Torsionshacke.

4.3 Rollstriegel

Die bodenangetriebenen Werkzeuge des Rollstriegels sind schräg zur Fahrtrichtung angeordnet. Damit können sie in kompletter Arbeitsbreite wirkend eingesetzt werden. Als Einzelelement erweitern sie direkt in der Pflanzenreihe die Wirkung der Hackwerkzeuge, vergleichbar mit der Finger- oder Torsionshacke. Dieses System wird von mehreren Herstellern in unterschiedlichen Varianten angeboten. Der Außenradius der in einem Abstand von 10–15 cm schräg angestellten Kunststoffscheiben ist sternförmig mit jeweils 16 Zinken ausgestattet. Die Zinkensterne sind pendelnd aufgehängt und ermöglichen eine gute Boden Anpassung. Über eine stufenlos hydraulische Druckverstellung lässt sich die Eindringtiefe der Zinken und damit der Arbeitseffekt variieren.

Die Sterne arbeiten in einem wählbaren Anstellwinkel zur Pflanzenreihe. Bei einem Anstellwinkel von 30° zur Fahrtrichtung wird ein Streifen von 6–12 cm quer gestriegelt. Neben dem Anstellwinkel bestimmen die Vorfahrtgeschwindigkeit, die Zinkenzahl und der Sterndurchmesser die Arbeitsqualität. Mit Arbeitsbreiten bis zu 15 m und Arbeitsgeschwindigkeiten von 8–10 km/h sind hohe Flächenleistungen möglich. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die Gefahr von Kulturpflanzenverlusten. Die optimale Anpassung von Zinkendruck und Fahrgeschwindigkeit erfordert besonderes Feingefühl. Ein wichtiger Vorteil ist der störungsfreie Einsatz in Mulchsaaten.

Sowohl mit der Finger- und Torsionshacke, als auch mit dem Rollstriegel lassen sich gute Regulierungserfolge erzielen. Entscheidend ist ein ausreichendes Wachstumsstadium der Kulturpflanze, um Pflanzenverluste auf ein Minimum (etwa 5%) zu reduzieren.



Abbildung 15: Mit Rollstriegeln sind hohe Flächenleistungen möglich (Foto: Einböck)



Abbildung 16: Anstellwinkel, Fahrgeschwindigkeit, Zinkenzahl und Sterndurchmesser bestimmen die Arbeitsqualität des Rollstriegels (Foto: Einböck)

5. Thermische und elektrophysikalische Verfahren

Im Vergleich zu mechanischen sind thermische Verfahren zur Unkrautbekämpfung von geringer Bedeutung. Bedingt durch hohe Brennstoffkosten (Gas) und geringe Flächenleistungen beschränkt sich ihr Einsatz auf Anwendungen in Sonderkulturen und in der Landschafts- und Kommunaltechnik. Für eine nachhaltig wirksame Bekämpfung der Unkräuter müssen ihre Sprosse auf mindestens 60°C erhitzt werden. Bedingt durch die kurze Einwirkzeit lassen sich nur Samenunkräuter im frühen Stadium beseitigen, Wurzelunkräuter und Gräser so gut wie gar nicht.

Neben dem Abflammen mit offener Gasflamme stehen zur Wärmeübertragung Infrarotstrahlung, Heißwasser und Heißdampf zur Verfügung. Bedingt durch den hohen Wasseraufwand haben auch

letztere nur ein begrenztes Einsatzgebiet im Bereich der Kommunaltechnik, wie z. B. Pflege von öffentlichen Wegen und Flächen.

Während die genannten Verfahren in der landwirtschaftlichen Praxis nahezu bedeutungslos sind, gewinnt die elektrophysikalische Unkrautvernichtung mit Hochspannung zunehmendes Interesse. Mit der Firma Zasso gibt es einen ersten Anbieter dieser Technik auf dem Markt.

Dieses als „Electroherb“ bezeichnete Gerät wird von der Firma Zasso aus Brasilien importiert. Im biologischen Anbau von Soja und Zuckerrohr wurde die Technik mit nachhaltigem Bekämpfungserfolg gegen mehrjährige Unkräuter und Gräser eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil der elektrischen Unkrautbekämpfung sind der Erhalt der Bodenbedeckung und die fehlende Bodenbewegung. Damit werden beste Voraussetzungen für die Etablierung von Direktsaatverfahren für einen dauerhaften Erosionsschutz geschaffen.

Über einen im Traktorheck angebauten 80 kW-Zapfwellengenerator wird elektrische Energie erzeugt, die über ein Kabel zu dem Frontanbau-Applikationsgerät mit zweireihig angeordneten Metallstreifen geleitet wird. Die Metallstreifen der ersten Reihe leiten den Strom auf die Pflanzen, die der zweiten Reihe nehmen ihn wieder auf, so dass ein geschlossener Stromkreis entsteht. Der durch Schleifkontakt entstehende Stromfluß bewirkt die Zerstörung der Pflanzenzellen. Auf diese Weise wird die Zufuhr von Wasser und Nährstoffen in die Pflanze unterbunden und sie stirbt ab, unabhängig von den jeweiligen Witterungsbedingungen. Je nach Anordnung der Metallstreifen ist eine ganzflächige oder streifenförmige Bearbeitung möglich und die Stromstärke lässt sich, den Pflanzenbeständen entsprechend, anpassen.

Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt zwischen 3 bis 6 km/h. Der erforderliche Anwenderschutz ist gegeben. Aus der Schweiz werden zwar erste vielversprechende Versuchsergebnisse vermeldet. Bisher liegen aber noch keine ausreichenden Praxiserfahrungen vor. Eine aussagekräftige Beurteilung und Bewertung ist deshalb nicht möglich. Das Interesse an dieser Technologie scheint aber vorhanden zu sein, wie die Entwicklung weiterer Prototypen, wie z. B. der Firma KFL Löwenberg oder der FH Aachen („ETA ROB“), beweisen.

5.1 Selektive elektronisch gesteuerte Unkrautregulierung zwischen und innerhalb der Pflanzenreihen

Die gezielte Regulierung von Unkraut zwischen und innerhalb der Pflanzenreihen mittels digitaler Technologien und selektiv arbeitenden Werkzeugen setzt Bedingungen voraus, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen:

- besonders bei heterogenen Pflanzenabständen – eine sichere Identifikation und Differenzierung von Unkräutern und Kulturpflanzen zur Positionsbestimmung der Pflanzen
- die Erkennung der Pflanzenreihe.

Basierend auf dem Einsatz optischer Systeme mit digitaler Bildverarbeitung wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Lösungen entwickelt. Den Auftakt der Entwicklungsarbeit machten Forschungsaktivitäten an mehreren Universitäten. Schließlich sind daraus Prototypen bis hin zu marktfähigen Produkten verschiedener Hersteller entstanden. Zur Erkennung von Pflanzenreihen, der Erfassung und Differenzierung von Unkräutern und Kulturpflanzen, sowie zur Positionsbestimmung der Pflanzen innerhalb der Reihe gibt es folgende Möglichkeiten:

- Satellitengestützte Navigation, Positionsbestimmung und Werkzeugsteuerung via GNSS (vorzugsweise in RTK-Genauigkeit) mit vorheriger Kartierung der Fahrspuren bei der Aussaat bzw. Pflanzung
- Erkennung der Pflanzenposition über optische Systeme (z. B. RGB-Bilder, Laser oder Lichtschranken) in Verbindung mit Bildverarbeitungssoftware
- Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanze mit akustischer Sensorik (Ultraschall).

Digitale Bildaufnahmen als die in Westeuropa am häufigsten eingesetzte Basis für die digitale Reihenführung basieren auf dem Einsatz lichtempfindlicher, elektrofotographischer Sensoren wie z. B. sogenannter CCD-Sensorchips (Charge Coupled Device) oder CMOS-Sensoren (Complementary Metal Oxide Semiconductor), die bevorzugt in hochwertigen Digitalkameras eingebaut werden. Die Herausforderung der Pflanzenerkennung in digitalen Bildern liegt darin, Pflanzen von Ernterückständen, Steinen und Boden zu unterscheiden und die dabei erkannten Pflanzen in Unkraut und Kulturpflanze zu differenzieren. Eine präzise Identifikation wird unter Anwendungsbedingungen häufig durch Umwelteinflüsse erschwert, was den Maßnahmenenerfolg signifikant verringern kann. Beispiele dafür sind sich ändernde Lichtverhältnisse (Schattenbildung oder Dunkelheit), Seitenwind, feuchteabhängige Reflexion von Pflanzen und Boden, korrespondierende Pflanzengrößen von Kultur- und Unkrautpflanzen, abweichende Chlorophyllgehalte durch Krankheiten oder Wasser- und Nährstoffmangel oder auch ungenügend sichtbare bzw. zu weit geschlossene Reihen. Häufig unterscheiden sich Kulturpflanzen derselben Gattung in Umriss, Farbe und Größe generell nur wenig von den Unkräutern und werden von bildverarbeitenden Verfahren in Konsequenz nur unzureichend erkannt.

Für die Bilderfassung und ihre Verarbeitung in Algorithmen stehen unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Sie sind gleichzeitig Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten und werden ständig weiterentwickelt und optimiert, so dass an dieser Stelle auf eine vertiefende Darstellung der Thematik verzichtet wird. Die vielversprechendsten Entwicklungen in den kommenden Jahren werden hierbei in der Erkennung morphologischer Kulturpflanzenparameter erwartet, um die Reihenführung auch unter widrigen Einsatzbedingungen weiter zu verbessern.

Stellvertretend für derzeit auf dem Markt verfügbare Technologien wird nachfolgend auf die elektronische Reihenführung wie auch Geräte zur automatischen Unkrautregulierung innerhalb der Reihen (automatische Hackgeräte genannt) bis hin zu den völlig autonom arbeitenden Hackrobotern genauer eingegangen.

5.2 Automatische Reihenführung

Eine exakte Führung der Hackmaschine ist Voraussetzung für einen möglichst hohen Regulierungserfolg bei gleichzeitig geringen Kulturpflanzenverlusten.

Bei im Heck angebauten Hackgeräten erfolgte die Steuerung durch die Auslenkungserfassung des Oberlenkers in Kurven und zur seitlichen Stabilisierung bisher ausschließlich über Scheibenseche oder Spurkranzräder. Höchste Präzision wurde durch eine zusätzliche Steuerperson auf der Hacke realisiert. Besonders in empfindlichen Gemüsekulturen trifft man diese Maschinenkonfiguration heute noch an. Vor allem aus Sicht der Fahrerentlastung und Erhöhung der Schlagkraft setzten sich allerdings immer mehr elektronische Verfahren zur Reihenführung und Pflanzenerkennung am Markt durch.

Der Einsatz von automatischen Lenksystemen in RTK-Genauigkeit bereits bei der Saat bietet gute Voraussetzungen für eine später exakte Reihenführung beim Hacken, da auch sensorgesteuerten Rei-

henführungen je nach Größe des Hackgerätes, Beschaffenheit der Kultur und den Umweltbedingungen (Hangneigung, Bodenart etc.) physikalische Grenzen gesetzt sind.

Zur Reihenführung der Hackgeräte sind mehrere Möglichkeiten in der Praxis verbreitet: Einerseits kommen GNSS-Empfänger auf Traktor und/oder Hackgerät zum Einsatz, die bereits beim Säen aufgezeichnete Spuren nachfahren. Die Lenkung erfolgt hier über den Traktor selbst. Außerdem möglich ist der Einsatz von Verschieberahmen, die als Linear- oder Parallelogrammverschieberahmen angeboten werden. Dabei ist umstritten, ob für das satellitengestützte Hacken bereits ein automatisches Lenksystem auf dem Traktor ausreichend ist, oder Sä- und Hacktechnik über einen Verschieberahmen gesteuert werden müssen. Der größte Vorteil der Systeme wird in der Unabhängigkeit von der Echtzeit-Reihenerkennung gesehen. So sind zeitlich sehr frühe oder späte Hackeinsätze möglich, ohne auf die Entwicklung der Kultur Rücksicht nehmen zu müssen.

Zur Steuerung der Verschieberahmen werden heute als Alternative zur Satellitennavigation überwiegend optische Kamerasysteme in unterschiedlichen Ausführungen verwendet. Sie ermöglichen eine Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit von üblicherweise 4–6 km/h auf 8–10 km/h und mehr, verbunden mit deutlicher Erhöhung der Flächenleistung und Präzision, sowie einer signifikanten Fahrerentlastung. Die Investitionssumme für das Gesamtsystem zur elektronischen Reihenführung (Sensorik, Steuerung, Aktorik) beläuft sich im Fall der Kamerahacke Stand 2019 auf netto ca. 18.000 €. Eine auf der Hackmaschine aufgebaute Kamera erfasst die Kulturpflanzenreihe sowie den Zwischenreihenbereich. Bilderkennungs- und Verarbeitungssysteme differenzieren Kultur- und Unkraut nach Farbe und/oder nach Pflanzengröße (die Größenunterscheidung ist auch mittels Ultraschallsensoren möglich). Ein Bordrechner verarbeitet die Signale zur Steuerung des Verschieberahmens.

Systeme mit spezieller lernfähiger Bildverarbeitung können nicht nur Konturen erkennen und Boden von grünen Pflanzen unterscheiden, sondern selbst verschiedene Grüntöne identifizieren und auf diese Weise ein betriebsspezifisches Unkrautspektrum erlernen, so dass sie selbst bei dichtem Unkrautbewuchs störungsfrei arbeiten. Systeme, bei denen die Live-Bilder der Kamera mit im Computer hinterlegten Vorlagen, z. B. mit gescannten Reihen unterschiedlicher Kulturpflanzen verglichen werden, bieten folglich einen zusätzlichen Nutzen, ebenso wie die Kombination verschiedener Lichtspektren.

Bei Systemen, die nach Pflanzengröße arbeiten, müssen die Kulturpflanzen in der Reihe deutlich höher sein als die Unkräuter, um eine sichere Führung zu gewährleisten. Starker Unkrautbewuchs schränkt ihre Funktion ein. Weitere Entwicklungen der Technologie werden in Zukunft vor allem hinsichtlich der verwendeten Bilderkennungs- und Verarbeitungssysteme erwartet, um unter allen Einsatzbedingungen Unkraut von Kulturpflanzen zu unterscheiden.

6. Vollautomatische Hackgeräte

Im Vergleich zu Systemen für die automatische Reihenführung ist das Angebot an marktverfügbaren vollautomatischen Hackgeräten relativ klein. Mit den Geräten ist es möglich, auch innerhalb der Pflanzenreihe Unkraut zu bekämpfen, was die Komplexität der Systeme deutlich erhöht. Alle im Folgenden aufgeführten Geräte stammen ursprünglich aus dem Gartenbau und Sonderkulturenbereich, wo mit gepflanzten Kulturen und einer dementsprechend gleichmäßigen Pflanzenverteilung in der Reihe gearbeitet wird. Diese Tatsache ist für einen erfolgreichen Einsatz wichtig, wenngleich man die Bedingungen in landwirtschaftlichen Großflächenkulturen häufig so nicht vorfinden kann. Hinsichtlich Preis und

Schlagkraft lassen sich die aktuell verfügbaren Maschinen nicht mit jenen zur automatischen Reihenführung vergleichen. Mit Investitionssummen von netto ca. 100.000 € für sechsreihige Geräte liegen die Flächenleistungen bei Fahrgeschwindigkeiten von maximal 3 km/h oft unter 1 ha/h. Aufgrund der hohen Investitionskosten für die Maschinen lohnt sich der Einsatz aktuell nur in Spezialkulturen mit einem hohen Handarbeitsaufwand, wie z. B. Bio-Zuckerrüben (ca. 150 h/ha), der mit Selektivhackmaschinen um etwa 75% reduziert werden kann.

6.1 Robocrop InRow Weeder

Hydraulisch bzw. elektrisch angetriebene Hackwerkzeuge mit einem sichelförmigen Scheibenprofil arbeiten innerhalb der Reihe etwa 1–2 cm tief. Das Scheibenprofil ist so gestaltet, dass sich das Hackmesser in einem Bogen rotierend um die Kulturpflanzen herum bewegt und dadurch den Bereich zwischen den Pflanzen bearbeitet. Die besondere Form des Werkzeuges und die Synchronisierung seiner Bewegung über den Jobrechner der Hackmaschine ermöglichen eine nahezu vollständige Bearbeitung der Fläche bei möglichst geringer Beeinträchtigung der Kulturpflanzen. Eine Zone von etwa 8 cm Durchmesser um die Pflanze bleibt unbearbeitet.



Abbildung 17: In Row Weeder von Garford
(Foto: B. Vinzent, LfL Bayern)

Die Positionsbestimmung der Pflanze erfolgt für jede Reihe einzeln anhand eines computergestützten Bilderkennungs- und -verarbeitungssystems auf Basis einer in ca. 1,7 m Höhe angebrachten Digitalkamera, die mehrere Reihen gleichzeitig erfasst. Über die Bildinformationen richtet sich die Hackmaschine automatisch über einen hydraulischen Verschieberahmen entlang der Reihe aus. Dabei erkennt das System jede einzelne Kulturpflanze und synchronisiert entsprechend der Pflanzenabstände die Drehzahl der in den Reihen rotierenden, sichelförmigen Hackelemente.

6.2 Robovator

Das Hackaggregat besteht aus zwei hydraulisch oder elektrisch angetriebenen Werkzeugträgern, an deren Ende sich jeweils ein Flachschar befindet. Gesteuert über eine Kamera für jede Pflanzenreihe mit zusätzlicher Beleuchtung greifen die Werkzeuge von beiden Seiten zwischen die Kulturpflanzen. Dabei wird der Pflanzenzwischenraum bearbeitet und der Standort der Kulturpflanze ausgespart, so dass sich in der Vorwärtsbewegung durch abwechselndes Öffnen und Schließen der Werkzeugträger ein sinusförmiger Verlauf ergibt.

Die Öffnungsweite der Werkzeuge in der Schließbewegung lässt sich über die Länge der beiden Hackmesser variieren. Zusätzlich können die Hackaggregate mit Gänsefußscharen zur Bearbeitung des Zwischenreihenbereiches ausgerüstet werden. Für die richtige Positionierung über der Pflanzenreihe verfügt die Maschine zusätzlich über einen integrierten Verschieberahmen.

Die Differenzierung zwischen Kulturpflanzen und Unkraut erfolgt über die Größenunterschiede der erkannten Pflanzen. Hierzu muss zuvor die Größe der Kulturpflanzen in das Bedienterminal eingegeben



Abbildung 18: Robovator: Die Werkzeuge regulieren Unkräuter in der Reihe (Foto: B. Vinzent, LfL Bayern)



Abbildung 19: Robovator: Kameras steuern die Werkzeuge (Foto: B. Vinzent, LfL Bayern)

ben werden. In Abhängigkeit vom Sicherheitsabstand zum Pflanzenmittelpunkt und dem erkannten Umriss der Kulturpflanze wird das Öffnen und Schließen der Werkzeuge gesteuert. Zur Bestimmung des Öffnungs- und Schließzeitpunktes wird die Fahrgeschwindigkeit erfasst.

6.3 IC-Weeder

Der IC-Weeder arbeitet kameragesteuert sowohl in als auch zwischen den Reihen (in der Reihe pneumatisch, zwischen den Reihen mechanisch) über einen zapfwellengetriebenen Kompressor und sichelförmigen Messern als Arbeitswerkzeuge. Es können sowohl die Öffnungsweite als auch die Schließgeschwindigkeit der schwenkbaren Messer eingestellt werden. Die Werkzeuge führen beim Eingriff in die Reihe eine Drehung von 90° aus und bleiben solange in dieser Position, bis der Schutzraum der nächsten Pflanze erreicht wird und schwenken dann wieder aus der Reihe heraus.

Zur Erkennung der Kulturpflanzen sind die unter einer Haube angebrachten Farb-Flächenkameras vom stets wechselnden Umgebungslicht abgeschirmt und der Detektionsbereich wird permanent von LED-Lampen gleichmäßig ausgeleuchtet. Das Sichtfeld einer Kamera beträgt 75 cm, wobei Farbe und Größe der Kulturpflanze sowie die Pflanzenposition zur Ermittlung des zu bearbeitenden Zwischenraumes berücksichtigt werden.



Abbildung 20: IC-Weeder von Steketee (Foto: Sutton Agricultural Enterprises)

Zur Erkennung der Kulturpflanzen sind die unter einer Haube angebrachten Farb-Flächenkameras vom stets wechselnden Umgebungslicht abgeschirmt und der Detektionsbereich wird permanent von LED-Lampen gleichmäßig ausgeleuchtet. Das Sichtfeld einer Kamera beträgt 75 cm, wobei Farbe und Größe der Kulturpflanze sowie die Pflanzenposition zur Ermittlung des zu bearbeitenden Zwischenraumes berücksichtigt werden.

6.4 Autonome Fahrzeuge

Sensorgesteuerte, selektiv arbeitende Hackmaschinen und Reihenführungen werden normalerweise als traktorgebundene Lösungen angeboten. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad gewinnen besonders kleine autonome Feldroboter an Bedeutung. Entsprechende Aktivitäten gibt es bereits weltweit seit Ende der 90er Jahre an verschiedenen Universitäten. Zu den Vorreitern in Deutschland gehört die

Hochschule Osnabrück, die mit der Firma Amazone erste Prototypen autonomer Fahrzeuge entwickelt hat. Diese Arbeiten führten schließlich 2014 gemeinsam mit den Firmen Amazone und Bosch zur Realisierung der autonomen Feldroboter-Plattform BoniRob mit einem beweglichen Roboterarm und einem sensorbasierten Stempelsystem zur mechanischen Einzelpflanzenbekämpfung. Wahlweise lässt sich dieses System auch für eine punktgenaue einzelpflanzenbezogene Herbizidapplikation verwenden.



Abbildung 21: BoniRob Feldroboter
(Foto: B. Vinzent, LfL Bayern)

Beim BoniRob handelt es sich um eine Versuchs- und Erprobungsplattform. Aus dem Projekt heraus entstanden in jüngerer Vergangenheit Aktivitäten von Deepfield Robotics, einem Startup der Firma Bosch, multifunktionale Agrarrobotik-Lösungen zu entwickeln. Leider verfügen bisherige Lösungen zur automatisierten und autonomen Unkrautregulierung oft noch nicht über die erforderliche Betriebssicherheit, um bei wechselnden Boden- und Klimabedingungen, Bewuchsintensitäten, Wachstumsstadien und Lichtverhältnissen eine gezielte Unkrautbekämpfung zu gewährleisten. Auch zukünftige infrastrukturelle Anforderungen an landwirtschaftliche Betriebe für den erfolgreichen Betrieb autonomer Roboterplattformen sind zum jetzigen Zeitpunkt noch zu klären. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der bildgebenden Systeme und Algorithmen sowie in zunehmend sicherer Aktorik lassen aber deutliche Fortschritte erkennen.

Denkbar ist beispielsweise auch eine Kombination von Drohnen und Feldrobotern für teilflächenspezifische Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen. Multispektrale und bildgebende Kameras erheben dabei beispielsweise während des Überfliegens eines Feldes Daten über Chlorophyllgehalt, Biomasseertrag und Bedeckungsgrad und übermitteln diese an den entsprechend ausgerüsteten Feldroboter zur mechanischen oder chemischen Beseitigung des Unkrautes.

Neben zahlreichen Projektstudien und Prototypen gibt es bereits Hersteller, die marktverfügbare Hackroboter auf dem Markt anbieten, wie z. B. Naïo und Carré. Beim Naïo Dino erkennt die eingebaute Stereokammer die Lage und Ausrichtung der Reihen sowie die Pflanzengröße und ermöglicht in Verbindung mit einer RTK-Lenkung eine präzise Reihenführung. Ein parallelogrammgeführter Werkzeugträger lässt sich mit unterschiedlichen Werkzeugen zur Unkrautbekämpfung zwischen und in den Reihen ausrüsten. Am Feldende werden diese automatisch ausgehoben und der Roboter wendet mit seinen vier elektrisch angetriebenen Rädern auf der Stelle und fährt zur nächsten Fahrspur. Bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von max. 5 km/h wird nach Herstellerangaben theoretisch eine tägliche Flächenleistung von bis zu 5 ha erreicht. Die Investitionskosten betragen ca. 100.000 €. Der Oz, eine kleinere Ausführung desselben Herstellers für die ausschließliche Bear-



Abbildung 22: Autonome Hackmaschine
(Foto: B. Vinzent, LfL Bayern)

beitung zwischen zwei Reihen fährt bis zu 1,5 km/h schnell und bearbeitet unter optimalen Bedingungen ca. 1 ha pro Tag.

Der Agrarroboter Anatis der Firma Carré lässt sich für unterschiedliche Arbeiten – nicht nur für die Unkrautbekämpfung – verwenden. Die elektrisch angetriebene Maschine mit Vierradlenkung verfügt über ein automatisches Lenksystem in RTK-Genauigkeit, das mit einer 3D-Kamerasteuerung kombiniert wird und sich über Smartphone bzw. Tablet bedienen lässt. Im Heck können unterschiedliche Hackwerkzeuge für die Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich angebaut werden.

Die hohen Investitionskosten und äußerst begrenzten Flächenleistungen beschränken den Einsatz der genannten Hackroboter bisher auf Spezialkulturen im Freiland und in größeren Gewächshäusern. Damit erfüllt diese Technologie noch nicht die Anforderungen des großflächigen Hackfruchtanbaus. Ob der gleichzeitige Einsatz mehrerer Roboter als Schwarm eine Alternative zu traktorgebundenen Lösungen oder gar zu entsprechenden chemischen Verfahren sein kann, muss deshalb im Kontext der Weiterentwicklung der Technologie erforscht werden und ist immer von den einzelbetrieblichen Gegebenheiten abhängig. Letztlich müssen sich Mehrwert und Erfolg autonomer Agrarrobotik unter gegebenen Rahmenbedingungen daran messen lassen, inwiefern sie die Nachhaltigkeitsindikatoren auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene adressieren kann.

7. Bewertung und Ausblick

Ökologische Treiber, gesellschaftliche Forderungen sowie politische Bestrebungen, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln weiter zu reduzieren, führen dazu, dass Verfahren der mechanischen Unkrautkontrolle über den biologischen Anbau hinaus auch in der konventionellen Landwirtschaft wieder zunehmend Verbreitung finden.

Striegel für die ganzflächige Unkrautregulierung und Hacken für die Bearbeitung zwischen den Pflanzenreihen werden in den unterschiedlichsten Ausführungen mit Arbeitsbreiten bis zu 24 m angeboten und ermöglichen es, kombiniert mit hochpräzisen Lenksystemen, Kamerasteuerungen und den damit verbundenen Reihenführungen Arbeitsgeschwindigkeiten bis zu 15 km/h und damit zu chemischen Verfahren vergleichbare Flächenleistungen zu erzielen. Die Technik hat sich vor allem im Bereich der elektronischen Reihenführung bewährt, ebenso wie das Angebot an Werkzeugen für eine zusätzliche passiv-mechanische Unkrautregulierung in der Reihe, wie z. B. Finger-, Roll- oder Torsionshacken.

Zunehmendes Interesse finden Geräte mit speziellen Werkzeugen zur Unkrautregulierung in der Reihe mit sehr komplexen Kamerasystemen zum vollautomatischen Hacken. Hier gibt es erfolgversprechende Ansätze, aber noch Raum für Verbesserungen bei der Bilderkennung und Werkzeugsteuerung, um den Anteil unbearbeiteter Flächen innerhalb der Reihe zu reduzieren und die Schlagkraft des Verfahrens zu erhöhen. Bedingt durch geringe Arbeitsgeschwindigkeiten sowie hohe Investitionskosten beschränkt sich der Einsatz dieser Geräte bisher auf Sonderkulturen. Werden durch die Verbesserungen im Bereich von Sensorik und Aktorik deutlich höhere Vorfahrtgeschwindigkeiten erreicht, könnten diese Geräte zukünftig auch für hackwürdige Großflächenkulturen interessanter werden.

Die Entwicklung autonomer Hacktechnik in Form von Feldrobotern befindet sich in einigen Punkten aktuell noch in den Anfängen. Erste Prototypen verschiedener Hersteller bieten vielversprechende Ansätze, besonders für den Einsatz in Sonderkulturen.

Unabhängig von der Gerätetechnik, ob Striegel oder Hacke, mit oder ohne Kamerasteuerung, wird der Regulierungserfolg mechanischer Verfahren vor allem von den jeweiligen Entwicklungsstadien der Unkraut- und Kulturpflanzen sowie entscheidend von den gegebenen Boden- und Witterungsbedingungen bestimmt. Die Anzahl der erforderlichen Überfahrten variiert je nach Unkrautgröße und Witterung, wobei kleinere Unkräuter deutlich sicherer erfasst werden.

Nachteile der mechanischen Unkrautregulierung können sich beispielsweise im Bereich der Wasser- und Winderosion ergeben. Ein störungsfreier Einsatz auf Mulchsaat- und Direktsaatflächen ist unter Umständen problematisch.

Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz von Hacke und Striegel sind neben einer exakten Werkzeugeinstellung letztlich die praktischen Erfahrungen des Anwenders und vertiefte Kenntnisse acker- und pflanzenbaulicher Zusammenhänge sowie das Bewusstsein von Fruchtfolgewirkungen.

Die alleinige mechanische Unkrautregulierung ist eine besondere Herausforderung, da oft nicht die Wirkungsgrade des chemischen Pflanzenschutzes erreicht werden. Sie reichen von wirkungslosen Einsätzen bis zu Wirkungsgraden von mehr als 80 % unter günstigen Bedingungen.

Für den konventionellen Landwirt bietet sich die Kombination mechanischer und chemischer Verfahren an, wie sie bereits in vielen Betrieben erfolgreich praktiziert wird. Damit verbunden sein kann eine Verringerung des Pflanzenschutzmittelaufwandes von bis zu 60 %. Auch hier geht die Entwicklung weiter, wie z. B. die Spot Spraying-Technologien der Firmen Blue River, Amazone oder Agrifac mit Bilderkennung und punktgenauer Einzeldüsenapplikation und damit verbundenen Aufwandmengenreduzierungen von bis zu 90 %.

8. Literatur

- Wilhelm, B., Hensel, O.: Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau. Berichte aus Forschung und Praxis, Universität Kassel, 2011, 288 S.
- Fischer, D.: Mechanische Unkrautkontrolle im biologischen Zuckerrübenanbau, Dissertation, Universität Hohenheim, 2012
- Bucher, U. P.: Entwicklung einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine mit elektrisch angetriebenem Werkzeug zur Unkrautregulierung im ökologischen Zuckerrübenanbau. Dissertation, Universität Hohenheim, 2018
- Bertram, A., Meyer, J.: Physikalische Verfahren zur Unkrautregulierung. KTBL-Arbeitsblatt, Darmstadt, 2005
- Heinrich, S.: Maschinenvergleich unterschiedlicher Selektivhacksysteme im biologischen Zuckerrübenanbau, Masterarbeit, Universität Hohenheim, 2018
- Müller, J., A. Baumert und K. Köller: Untersuchung einer bodengetriebenen, rotierenden Fingerhacke. Agrartechnische Forschung 3 (1997), H. 1, S. 1–8
- Ruckelshausen, A.: Von der Automation zur Autonomie. DLG-mitteilungen, 2019, H.5, S. 72–74
- Gandorfer, M., Heuser, S., Demmel, M.: Automatisierte mechanische Unkrautregulierung: Überblick und Bewertung. Tagungsband Landtechnik für Profis 2018
- Vinzent, B.: Wo steht die automatische mechanische Unkrautbekämpfung? Blog zur DLG-Wintertagung 2019 (URL: <https://www.dlg-wintertagung.de/blog/wo-steht-die-automatische-mechanische-unkrautbekaempfung/>)

DLG-ANERKANNT. Qualität für die Praxis geprüft



GESAMT-PRÜFUNG
HERSTELLER
PRODUKT
DLG-Prüfbericht 0000

Erst informieren, dann investieren!

4.000 Prüfberichte online unter www.DLG-Test.de

www.DLG.org



DLG-Merkblätter. Wissen für die Praxis.

- DLG-Merkblatt 432
**Resistenzmanagement
im Ackerbau –
Herbizidresistenz**
- DLG-Merkblatt 427
**Resistenzmanagement
im Ackerbau –
Insektizidresistenz**
- DLG-Merkblatt 431
**Artenvielfalt und Biodiversität
stärken im Ackerbau**
- DLG-Merkblatt 424
**Ackerbau zukunftsfähig
gestalten**



Download unter www.DLG.org/Merkblaetter



DLG e.V.
Mitgliederservice
Eschborner Landstraße 122 • 60489 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel. +49 69 24788-205 • Fax +49 69 24788-124
Info@DLG.org • www.DLG.org