



Abteilung Gartenbau

Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Universität für Bodenkultur Wien

**Vergleich verschiedener nicht-chemischer Maßnahmen zur
Beikrautregulierung im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau**

Masterarbeit

gestellt von:

Anna Keutgen, Univ. Prof. Dipl.-Ing.sc.agr.Dr.sc.agr.

verfasst von:

Theresa Babucke, B.Sc.

Wien, Juli 2019

Vergleich verschiedener nicht-chemischer Maßnahmen zur Beikrautregulierung im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau

Theresa Babucke

Kurzfassung

Die Bedeutung nicht-chemischer Beikrautregulierung im Gemüsebau nimmt unter anderem aufgrund zunehmender Herbizidresistenzen, der Nachfrage nach biologischem oder pestizidfreiem Gemüse von Seiten der Konsumenten sowie aus Gründen des Umweltschutzes zu. Diese Arbeit beschäftigt sich mit verschiedenen Maßnahmen, die bei der Beikrautregulierung im nicht-chemischen Zwiebel- und Kohlgemüseanbau (*Allioideae* und *Brassica*) zum Einsatz kommen, darunter unter anderem kulturtechnische Maßnahmen wie beispielsweise Fruchtfolge und Bodenbearbeitung, mechanische, thermische und biologische Maßnahmen. Mittels einer Literaturanalyse wird die Effizienz, die Robustheit und die Qualität der verschiedenen Maßnahmen analysiert sowie spezifische Merkmale, Probleme und Anwendungsvoraussetzungen. Ergänzend dazu fließen die Erfahrungen zweier biologisch praktizierender Landwirte in die Analyse mit ein. Obwohl alles übergreifende Folgerungen schwierig sind, kann festgestellt werden, dass viele der analysierten Maßnahmen an Effektivität gewinnen, wenn jedoch gleichzeitig unerwünschte Faktoren (Ertrags-/Qualitätsreduktion; Bodenverdichtung; Ressourcenaufwand) zunehmen. Die Effektivität vieler Maßnahmen kann durch die Kenntnis der auftretenden Beikrautpopulation (Zusammensetzung, Dichte etc.), der Bodenparameter, der Zeitpunkte niedriger Sensibilität der Kulturpflanzen und hoher Sensibilität der Beikräuter in großem Maße beeinflusst werden.

Comparison of different non-chemical methods for weed control in onion and cabbage production

Theresa Babucke

Abstract

The importance of non-chemical weed control in vegetable production rises due to increasing herbicide resistances, the demand of consumers for organic or pesticide-free vegetables and in terms of environmental protection. In this context, this paper deals with different methods of weed control in non-chemical production of vegetable of the onion- and cabbage-family (*Allioideae* und *Brassica*), like indirect methods (for example crop rotation or soil cultivation), mechanical, thermal and biological methods. In this literature review the efficiency, robustness and quality of the various measures as well as specific characteristics, problems and application requirements are analysed. In addition, the experience of two organic farmers complement the analysis. Although overarching implications are difficult, it can be stated that many of the analysed methods gain in effectiveness, if at the same time, undesirable factors (yield / quality reduction, soil compaction, resource consumption) increase. The effectiveness of many methods can be greatly influenced by the knowledge of the emerging weed population (composition, density, etc.), the soil parameters, the time of low sensitivity of crops and high sensitivity of weeds.

Danksagung

Ich danke allen Menschen, die mich während meines Studiums unterstützt, begleitet und motiviert haben. Dazu gehören neben meiner Familie, allen voran meinen Eltern Susanne und Marcus Babucke, und meinem Partner Paul Krack auch meine Freundinnen Johanna Schaubmayr und Lara Grevis.

Außerdem bedanke ich mich bei den Personen, die diese Arbeit durch ihre Betreuung, Beratung und Auskunft ermöglicht haben. In erster Linie geht dieser Dank an meine Betreuerin, Frau Professorin Anna Keutgen.

Des Weiteren danke ich allen Verlagen und Zeitschriften, die mir beim Zugang zu Quellen entgegengekommen sind und Verständnis dafür gezeigt haben, dass das Ausmaß an Quellen die finanziellen Möglichkeiten einer Masterarbeit übersteigt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Ergebnisse und Diskussion | 6 |
| 2.1 | Anbaubedingungen..... | 6 |
| 2.1.1 | Anbau von Zwiebelgemüse | 6 |
| 2.1.2 | Anbau von Kohlgemüse | 8 |
| 2.2 | Probleme der Beikrautregulierung | 9 |
| 2.2.1 | Beikrautregulierungsprobleme beim Anbau von Zwiebelgemüse | 11 |
| 2.2.2 | Beikrautregulierungsprobleme beim Anbau von Kohlgemüse | 12 |
| 2.3 | Kulturtechnische Maßnahmen und Prävention | 13 |
| 2.3.1 | Verhinderung des Ausbreitens von Beikräutern..... | 13 |
| 2.3.2 | Fruchtfolge, Zwischenfrüchte, Untersaat und Mischkultur..... | 14 |
| 2.3.3 | Bodenbearbeitung, Saat- bzw. Pflanzbettvorbereitung und Saat | 20 |
| 2.3.4 | Sortenwahl, Sortenqualität und Saaddichte bzw. Pflanzabstand..... | 22 |
| 2.3.5 | Einfluss von Düngemaßnahmen..... | 25 |
| 2.3.6 | Unkrautkur / Falsches Saatbett..... | 26 |
| 2.4 | Physikalische Maßnahmen der Beikrautregulierung..... | 27 |
| 2.4.1 | Mechanische Beikrautregulierung..... | 27 |
| 2.4.1.1 | Mechanische Geräte zur Beikrautregulierung..... | 28 |
| 2.4.1.2 | Automatisierte Lenksysteme und Roboter | 41 |
| 2.4.2 | Mulchen..... | 46 |
| 2.4.3 | Elektrische Beikrautregulierung..... | 49 |
| 2.4.4 | Thermische Beikrautregulierung..... | 50 |
| 2.5 | Biologische Maßnahmen der Beikrautregulierung..... | 56 |
| 2.6 | Manuelle Beikrautregulierung..... | 62 |
| 3 | Schlussfolgerung | 64 |
| 4 | Literaturverzeichnis | 67 |
| 5 | Anhang | 73 |
| 5.1 | Gedächtnisprotokoll der Expertenbefragung – Thema: Nicht-chemische Beikrautregulierungsmaßnahmen im Zwiebelanbau..... | 73 |
| 5.2 | Gedächtnisprotokoll der Expertenbefragung – Thema: Nicht-chemische Beikrautregulierungsmaßnahmen im Krautanbau..... | 75 |
| 6 | Eidesstattliche Erklärung | 77 |

1 Einleitung

Unkraut stellt ein Problem für den Pflanzenbau dar, da es mit der Nutzpflanze in Konkurrenz um Licht, Wasser, CO₂ und Nährstoffe tritt (Krug et al., 2002). Auf diese Weise begrenzt Unkraut einerseits direkt den Ertrag und ist damit für 32% der weltweiten Ertragsverluste verantwortlich (Oerke und Dehne, 2004). Andererseits beeinflusst Unkraut durch schlechtere Durchlüftung auch die Gesundheit des Kulturpflanzenbestandes indirekt negativ. Das kann genauso wie Wasser- oder Nährstoffmangel zu Qualitätseinbußen führen. Hinzu kommt, dass die Ernte durch Unkraut erschwert werden kann (Laber, 2009).

Nichtsdestotrotz hat Unkraut auch positive Effekte, weshalb auch es korrekt als Beikraut bezeichnet wird. So dient Beikraut als Schutz vor Nährstoffauswaschung und Wind- und Wassererosion, bietet Ablenkfutter für Schädlinge und Lebensraum für Nützlinge, die als Gegenspieler von Pflanzenschädlingen von großer Bedeutung sind (Davies und Lennartsson, 2008). Des Weiteren soll eine Diversität an Beikräutern die Widerstandskraft einer Kultur gegenüber Schädlingen erhöhen (Zwerger und Ammon, 2002).

In Anbetracht dieser positiven Einflüsse von Beikräutern geht es in dieser Arbeit genauso wie beim Beikrautmanagement im Ökolandbau generell nicht um das vollständige Verbannen des Beikrauts, was ohne den Einsatz von Chemie sowieso schwer umsetzbar ist. Vielmehr ist das Ziel eines ökologischen Beikrautmanagements, den Befall so niedrig zu halten, dass es tolerierbar, aber dennoch jederzeit kontrollierbar ist (Davies und Lennartsson, 2008).

Aufgrund des relativ kurzen Wachstumszeitraums und u.a. rohen Verzehrs bestehen bei der chemischen Beikrautregulierung im Gemüseanbau höhere gesundheitliche und umweltbelastende Probleme als beispielsweise im Ackerbau (Tei und Pannacci, 2008). Die in vielen gartenbaulich genutzten Böden vorherrschende grobe Bodentextur kann bei einem regelmäßigen Herbizideinsatz schneller zu einer Anpassung der Beikräutflora und gegebenenfalls zu Herbizidresistenzen führen (Tei und Pannacci, 2008). Aus diesen Gründen ist die nicht-chemische Beikrautregulierung im Gemüsebau zu bevorzugen. Auch die hohen Kosten der Herbizide sowie häufig ändernden behördlichen Beschlüsse zur Herbizidanwendung bestätigen dies (Tei und Pannacci, 2008). In manchen Fällen bedingt auch das Vorkommen von Beikrautarten, gegen welche die zur Verfügung stehenden Herbizide nicht ausreichend wirken, die Wahl nicht-chemischer Maßnahmen (Melandner et al., 2015).

Problemstellung

Auf vielen biologisch bewirtschafteten Gemüsebauflächen steigt mit den Jahren der Unkrautdruck. Das ist oft auf mangelndes strategisches Vorgehen gegen Beikraut zurückzuführen. Als Folge kommt es oft zu einer relativ hohen Beikrauttoleranz, die dann ebenfalls Grund für einen steigenden Beikrautdruck ist. Dem immer weiter zunehmenden Potenzial an Beikrautsamen im Boden kann nur mit passenden Maßnahmen der Beikrautregulierung entgegengewirkt werden (Puffert, 2011). Gemüsebaubetriebe im generellen und speziell biologisch wirtschaftende sind oft Vielfaltsbetriebe. Häufig werden viele verschiedene Gemüsearten angebaut, weshalb bei der Beikrautregulierung versucht wird, wenige vielseitig einsetzbare Geräte wie z.B. Beetstriel und Scharhacke in möglichst allen Kulturen einzusetzen. Das führt dazu, dass spezialisierte Verfahren, die die Unkrautregulierung einzelner Kulturen besser erledigen würden, sowohl in der Entwicklung als auch im praktischen Einsatz oft nur geringe Beachtung finden (Puffert, 2011). Ein weiterer Grund, nicht-chemische Beikrautregulierungsmaßnahmen näher zu betrachten ist der hohe Arbeits- und Kostenaufwand, der in herbizidfrei wirtschaftenden Betrieben für das Handjäten von Reihenkulturen wie Kohl- oder Zwiebelgemüse investiert werden muss. In den Niederlanden beträgt der Arbeitsaufwand für das manuelle Jäten in ökologischen Reihenkulturen beispielsweise im Schnitt 45 Stunden pro Hektar und bei gesäten Zwiebeln sogar 175 Stunden pro Hektar (Van der Weide et al., 2008). Melander et al. (2005) zufolge liegt der Zeitaufwand bei gesäten Zwiebeln und Lauch sogar zwischen 100 und 400 und bei Zwiebeln im schlimmsten Fall bei 600 Stunden pro Hektar.

2. Literaturübersicht

Im Bereich der Beikrautregulierung ist es üblich, dass sich die Literatur, statt auf eine Kulturpflanze oder eine Pflanzenfamilie, auf eine bestimmte Technik oder Maßnahme spezialisiert. So konzentriert sich beispielsweise die Arbeit von Griepentrog und Dedousis (2010) auf mechanische Beikrautregulierung, jedoch nicht unbedingt in Bezug auf Kohl- bzw. Zwiebelgemüse. Die von Wilhelm und Hensel (2011) herausgegebene Sammlung „Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau“ beinhaltet viele Praxis- und Forschungsberichte zu verschiedenen in dieser Arbeit thematisierten Maßnahmen. Als aktuelle Trends im Bereich der Beikrautregulierung lassen sich das Mulchen (z.B. Brown und Gallandt, 2018; Lešnik et al., 2018), Allelopathie und Bioherbizide (z.B. Quasem und Issa, 2018; Cai und Gu, 2016; Jabran et al., 2015) sowie Lebendmulchsysteme bzw. Untersaat (z.B. Ebrahimi et al., 2016; Hussain et al., 2017; Montemurro et al., 2016) vermerken. Robačar et al.

(2016) behandeln ebenfalls den Einfluss von Zwischenfrüchten und Untersaat auf die Beikrautregulierung. Nicht-chemische Beikrautregulierung in konservierenden Anbauverfahren, wie sie im Ackerbau schon weiter verbreitet sind, zählen ebenso zu den Neuheiten im Gemüsebau (Brainard et al., 2013, Buchanan et al., 2016). Jedoch bleiben auch altbewährte Methoden wie das Abflammen ein wichtiges Thema (z.B. Sivesind et al., 2012). Bezüglich Neuheiten im Bereich intelligente Systeme ist eine Forschung von Melander et al. (2015) speziell zu Zwiebeln und Kohl von großer Relevanz. Ein Großteil der Literatur beschreibt ein ganz spezifisches Versuchsdesign und dessen Ergebnisse, teilweise mit von dieser Arbeit abweichenden Kulturen. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse sowie ein direkter Vergleich mit anderen Arbeiten und Maßnahmen ist daher nur bedingt möglich.

Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich verschiedener derzeit bestehender Maßnahmen, die zur nicht-chemischen Beikrautregulierung beitragen sowie deren Evaluierung hinsichtlich der Effizienz und Anwendung. Dabei soll es nicht allein um Maßnahmen der Beikrautbekämpfung gehen, sondern auch um ein präventives Management und Kulturmaßnahmen wie Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Saatbettbereitung, Voraufbauverfahren wie Unkrautkur oder Abflammtchnik, Sä- bzw. Pflanztechnik, Saat- und Pflanzmenge, Saattiefe, Aussaatzeit, Allelopathie und Sortenwahl. Die mechanischen Regulierungsgeräte wie Striegel, Schar-, Torsions- und Fingerhacke genauso wie physikalische Methoden wie Abflammen und Mulchen sowie biologische Methoden (Bioherbizide) wurden betrachtet. Alle behandelten Maßnahmen wurden auf ihre Eignung, Beikraut im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau (in und zwischen den Reihen) zu regulieren, analysiert mit dem Ziel, die Maßnahmen beispielsweise in Bezug auf deren Effizienz vergleichen zu können. Sofern die vorhandene Literatur es zulässt, wurden die Entwicklung der Kulturpflanze, häufig in Zwiebel- und Kohlgemüse auftretende Beikräuter und standortspezifische Merkmale mancher Verfahren berücksichtigt. In Anbetracht des technischen Fortschritts wurden auch automatisierte Steuerungssysteme und Robotik auf deren derzeitige Eignung und deren Potenzial analysiert. Durch das Aufzeigen von Anwendungsvoraussetzungen, Problemen und besonderen Merkmalen der verschiedenen Maßnahmen sollten neue Kombinationen beispielsweise von kulturtechnischen und direkten Maßnahmen überlegt werden. Denn es steht eine Vielzahl von Maßnahmen zur Auswahl, die, wenn sie passend aufeinander abgestimmt werden, es möglich machen, das Beikrautpotenzial möglichst von Anfang an niedrig zu halten. Denn niedriger Beikrautdruck ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Beikrautregulierung (Bolten und Wilhelm, 2011).

Forschungsfragen

Diese Ziele wurden anhand folgender Forschungsfragen untersucht:

- Welche nicht-chemischen Maßnahmen eignen sich besonders gut zur Beikrautregulierung im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau?
- Wie unterscheiden sich die untersuchten Beikrautregulierungsmaßnahmen voneinander, im Besonderen in Bezug auf Robustheit, Effizienz und Qualität im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau?
- Was sind die spezifischen Merkmale, Probleme und Anwendungsvoraussetzungen der verschiedenen Beikrautregulierungsmaßnahmen?

Methodik

Aufgrund der Relevanz der nicht-chemischen Beikrautregulierung in der ökologischen Landwirtschaft wie auch in der nicht-ökologischen Landwirtschaft ist bereits viel Literatur aus vorangegangener Forschung vorhanden. Die Grundlage dieser Arbeit besteht im Vergleich dieser Literatur in Bezug auf Beikrautregulierungsmethoden, die im Kohl- bzw. Zwiebelanbau Anwendung finden.

Zu Beginn wurden die Anbaubedingungen ökologischen Zwiebel- und Kohlgemüses kurz geschildert. Dies ist unumgänglich, um die Möglichkeiten der Beikrautregulierung nachvollziehen zu können. Im Anschluss daran wurde in aller Kürze auf bestehende Probleme in der Beikrautregulierung eingegangen. Auf diese Weise wird verdeutlicht, wo Schwachstellen im bestehenden Beikrautregulierungsmanagement liegen.

Daran knüpft die Analyse der heute bekanntesten Maßnahmen an. Zur Analyse jeder Maßnahme wurden die in den Forschungsfragen genannten Kriterien herangezogen. Neben der Zuverlässigkeit, beispielsweise in Bezug auf Witterung, der Effektivität und in Bezug auf Ressourcen- und Kostenaufwand Effizienz wurde auch deren Qualität in Form von Ertragseinbußen und Pflanzenbeschädigungen betrachtet. Zusätzlich dazu wurde auf spezielle Charakteristika und Probleme eingegangen.

Die Basis dieser Literaturanalyse stellten die Fachwerke zur Beikrautregulierung dar, welche die verschiedenen Maßnahmen ausführlich beschreiben. Darauf aufbauend wurden, zumeist aktuellere, wissenschaftliche Fachzeitschriften untersucht. Diese wurden mit Schlagwörtern

wie *Beikrautregulierung*, *Unkrautbekämpfung* bzw. den englischen Äquivalenten *weed management*, *weed control*, jeweils in Bezug auf *Gartenbau*, *Gemüsebau*, *Kohl-/Blumenkohl- und Zwiebel-/Lauchanbau* bzw. *-produktion* ausgewählt. Während die Ergebnisse bei der Suche nach *Beikrautregulierung* meist auf nicht-chemische Methoden hinausliefen, wurde in Bezug auf *Unkrautbekämpfung* auch speziell nach *nicht-chemisch* beziehungsweise *ökologisch* und *ökologischem Anbau* beziehungsweise *ökologischem Gartenbau* und den jeweiligen englischen Pendanten gesucht. Darüber hinaus wurde auch spezifisch nach einzelnen Methoden wie beispielsweise *GPS basierten* bzw. *gps based* Methoden recherchiert. Insgesamt wurden 109 veröffentlichte Arbeiten zu den genannten Suchbegriffen untersucht.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den für die Zwiebel- und Kohlgemüseproduktion geeigneten Beikrautregulierungsmaßnahmen. Diese beiden Gruppen wurden ausgewählt, da sie in Bezug auf die Beikrautregulierung große Unterschiede aufweisen. Während Zwiebelgemüse eine sehr langsame Entwicklung und eine schwache Konkurrenzfähigkeit gegenüber Beikräutern aufweist, verfügt Kohlgemüse durch seine Morphologie ab einem gewissen Entwicklungsstadium über eine gute Konkurrenzkraft. Innerhalb des Zwiebelgemüses, die botanisch betrachtet als Lauchgewächse (*Alliaceae*) abzugrenzen sind, haben Zwiebeln mit 163.292 t (Stand 2016) und Porree mit 5.761 t hinsichtlich der Produktionsmenge in Österreich die größte Bedeutung (Agrarmarkt Austria, 2017). Die wichtigsten Vertreter des Kohlgemüses stellen in Österreich mengenmäßig Weißkraut mit 34.974 t und Karfiol mit 3.240 t Produktionsmenge im Jahr dar (Agrarmarkt Austria, 2017). Aufgrund dieser ökonomischen Bedeutung wird innerhalb des Zwiebelgemüses bevorzugt auf Zwiebeln und Lauch und bezüglich des Kohlgemüses bevorzugt auf den Anbau von Karfiol und Weißkraut beziehungsweise dem anbautechnisch sehr ähnlichen Rotkraut (7.486 t/Jahr) eingegangen (Agrarmarkt Austria, 2017). Die Analyse bezüglich des Karfiols kann ebenfalls sehr gut auf den mit 2.646 t Produktionsmenge im Jahr nicht unbedeutenden Brokkoli übertragen werden (Agrarmarkt Austria, 2017).

Ergänzend zu dieser theoretischen Literaturanalyse wurden zwei Landwirte, die ökologisches Feldgemüse anbauen, zu deren Beikrautregulierungsmanagement und Praxiserfahrungen mit verschiedenen Maßnahmen befragt.

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Anbaubedingungen

Die pflanzenbaulichen Anbaubedingungen einer Kulturpflanze entscheiden darüber, welche kulturtechnischen Maßnahmen, wie beispielsweise auch Beikrautregulierung, geeignet sind und zu welchem Zeitpunkt möglich sind. Deshalb wird in den folgenden beiden Kapiteln kurz auf die relevantesten Aspekte eingegangen.

2.1.1 Anbau von Zwiebelgemüse

Speisezwiebeln (*Allium cepa* L. / *Allium fistulosum* L.)

Entsprechend ihrer Ansprüche werden Zwiebeln häufig auf mittelschweren, humosen Böden wie sandigen Lehmen angebaut. Böden, die verschlammungsgefährdet sind, sowie schwere Tonböden werden meist gemieden (Laber, 2009).

Infolge der hypogäischen Keimung der Zwiebel verbleibt das Keimblatt vorerst unter der Erde und schiebt sich bügel förmig nach oben. Zu diesem Zeitpunkt spricht man vom sogenannten 'Bügelstadium'. Im darauffolgenden 'Peitschenstadium' befindet sich die Keimblattspitze bereits über der Erde. Sowohl im Bügelstadium als auch im Peitschenstadium kann das sogenannte Nachauflaufabflammen durchgeführt werden, wobei im Peitschenstadium mit größeren Verlusten zu rechnen ist. Dies ist dadurch möglich, dass beim Abflammen nur die oberirdischen Pflanzenteile beschädigt werden. Der Vegetationskegel ist allerdings im Boden gut geschützt und sorgt sofort nach dem Abflammen für einen neuen Austrieb (Laber, 2009; Krug et al., 2002).

Während Zwiebeln üblicherweise gesät werden, werden vornehmlich im ökologischen Anbau auch häufig Steck- oder Pflanzzwiebeln gepflanzt (Krug et al., 2002). Die Entscheidung zwischen Sä, Steck- und Pflanzzwiebeln wird durch Faktoren wie verfügbare Pflanzgeräte, Verwendungszweck, betriebliche Voraussetzungen und verfügbaren Arbeitskräften zum Handjäten beeinflusst (Koller et al., 2007). Der Ertrag ist laut Koller et al. (2007) bei allen drei Anbausystemen vergleichbar, laut Ascard und Fogelberg (2008) bei Pflanzzwiebeln höher als bei gesäten Zwiebeln. Das Säen von Zwiebeln birgt im biologischen Anbau ein hohes Anbaurisiko und ist mit vielen Arbeitsstunden für das Handjäten verbunden (Koller et al., 2007). Grund dafür ist die lange Keimdauer von je nach Temperaturverhältnissen um die 30

Tagen und die langsame Jugendentwicklung, durch welche Zwiebeln den für die anschließende mechanische Beikrautregulierung notwendigen Entwicklungsvorsprung gegenüber Beikräutern verlieren (Krug et al., 2002). Anbausysteme mit Steckzwiebeln und Jungpflanzen bieten mehr Möglichkeiten der Beikrautregulierung, beispielsweise für die Unkrautkur (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994). Denn durch die spätere Pflanzung ist im Gegensatz zur früher durchgeführten Saat mehr Zeit für die Unkrautkur. Dadurch ist der Aufwand für das Handjäten um etwa 50 Prozent reduziert (Koller et al., 2007). Allerdings sind die Produktionskosten durch das Pflanzmaterial und die Pflanzung höher als beim Säen von Zwiebeln (Koller et al., 2007). Bei hohen Personalkosten für das Handjäten und gleichzeitig erzielbaren hohen Preisen für organisch produzierte Zwiebeln ist das Pflanzen dem Säen wirtschaftlich bei weitem überlegen (Ascard und Fogelberg, 2008). Allerdings können niedrigere Lohnkosten und längere Vegetationsperioden zu abweichenden Ergebnissen von jenen führen, welche Ascard und Fogelberg (2008) in Nordeuropa konstatierten. Festzuhalten ist jedenfalls, dass mit abnehmender Länge der Vegetationsperiode Pflanzzwiebeln gegenüber gesäten besser abschneiden, da sie eine kürzere Wachstumszeit haben.

Sowohl die Speisezwiebel als auch der Lauch gelten aufgrund ihrer langsamen Jugendentwicklung als sehr konkurrenzschwach gegenüber Beikräutern. Ihr Anbau wird deshalb nur auf Böden mit niedrigem Beikrautsamenpotenzial empfohlen (Pannacci et al., 2017). Zwiebeln sind erst ab einer Schlottenlänge von etwa 10-15 cm konkurrenzfähig gegenüber Beikräutern (Koller et al., 2007). In der sogenannten kritischen Periode zuvor ist die Beikrautregulierung besonders wichtig.

Porree (*Allium porrum* L. var. *porrum*)

Porree ist wirtschaftlich in Europa unter anderem aufgrund der ganzjährigen heimischen Verfügbarkeit durch lange Ernteperioden und gute Lagerfähigkeit von großer Relevanz (Krug et al., 2002).

Porree wird sowohl unter konventionellen als auch unter ökologischen Wirtschaftsbedingungen meist gepflanzt. Eine Saat verringert die Schaftlänge und somit die Qualität und würde zusätzlich den Aufwand der Beikrautregulierung im ökologischen Anbau erhöhen. Genauso wie Speisezwiebeln wird Lauch maschinell gerodet. (Krug et al, 2002)

Aufgrund der langsamen Jugendentwicklung ist es vor allem zu Kulturbeginn wichtig, dass die Bestände möglichst unkrautfrei sind. Gepflanzter Porree kann, gegebenenfalls mit Schutzschild, mit angewinkeltem Brenner seitlich zur Pflanzenbasis hin bis zu einer

Wuchshöhe von 8 bis 10 cm abgeflammt werden. Ebenso ist das Striegeln nach dem Anwachsen eine übliche Beikrautregulierungsmaßnahme. Das in der Porreeproduktion übliche Häufeln mit dem Ziel, den Weißanteil am Schaft zu erhöhen, dient nebenbei auch der Verschüttung der Beikräuter in der Reihe. Allerdings werden diese vor allem im Zwei- bis Vierblattstadium erfolgreich beseitigt, was mehrere Häufelvorgänge erfordert. Alle mechanischen Maßnahmen müssen außerdem so ausgeführt werden, dass Blattachsen des Porrees möglichst nicht mit Erde beschüttet werden (Laber, 2009).

Während dichtere Pflanzenbestände zu einer verzögerten Ernte leichter Stangen und einem höheren Gesamtertrag führen, erleichtern lichtere Bestände die mechanische Beikrautregulierung. Zu enge Reihenabstände können die Wirkung des Ab- und Anhäufelns minimieren und zu stärkeren Beschädigungen des Porrees führen (Laber, 2009).

Trotz der guten Eignung schwerer Böden für die hohen Nährstoff- und Wasseransprüche wird Porree bevorzugt auf leichten bis mittelschweren, humosen Böden angebaut. Diese Böden eignen sich besser für die maschinelle Rodung und reduzieren den Putzaufwand. Standorte mit leichtem bis mittelschwerem Boden neigen außerdem weniger zu Staunässe, welche sich ungünstig auf Porree auswirkt (Krug et al., 2002).

2.1.2 Anbau von Kohlgemüse

Während Frühlkohl gerne in Regionen mit mildem Klima, leichtem und warmen Boden angebaut wird, wird Herbst- und Lagerkohl bevorzugt auf schweren, besser Wasser haltenden Böden angebaut (Heilmann und Zimmer, 1990). Die hohen Ansprüche an die Wasserversorgung des Herbst- und Lagerkohls sowie des Blumenkohls bedingen, dass diese oft auf schweren, tiefgründigen Böden angebaut werden (Krug et al., 2002).

Die Bodenbearbeitung sowie die mechanischen Maßnahmen der Beikrautregulierung sind bei unterschiedlichen Bodenbedingungen mehr oder weniger erfolgsversprechend. Aus diesem Grund variiert die Eignung verschiedener Maßnahmen teilweise zwischen leichten (Frühlkohl) und schweren Böden mit hoher nutzbarer Feldkapazität (Herbstkohl, Blumenkohl). Bei der Analyse von Versuchsergebnissen wird deshalb, soweit möglich, versucht, die vorherrschenden Bodenbedingungen zu berücksichtigen.

In trockenen Regionen muss Kohlgemüse vor allem auf Standorten mit leichtem Boden bewässert werden. Der starkzehrende Kohl ist eine pflanzenschutztechnisch anspruchsvolle Kultur, bei der lange Anbaupausen eingehalten werden müssen. Die Durchführung einer

Unkrautkur vor dem Pflanzen ist ein wichtiges Element der Unkrautregulierung beim Anbau von Kohlgemüse. Die Beikrautregulierung in der Reihe stellt bei Kohlgemüse kein großes Problem dar, da in jungen Beständen aufgrund der recht weiten Reihenabstände gut gehackt werden kann und der Kohl anschließend durch die gute Bodendeckung relativ konkurrenzfähig ist. Beikräuter in der Reihe können durch an- bzw.- abhäufeln, Finger-, Torsions-, Handhacke oder Ähnlichem mehr oder weniger gut in Schach gehalten werden (Heilmann und Zimmer, 1990).

Kohlgemüse, das zur Lagerung oder zum Verkauf als Frischmarktware bestimmt ist und deshalb keine Beschädigungen vorweisen darf, wird überwiegend von Hand geerntet, teilweise kombiniert mit Erntebändern. Maschinell wird fast einschließlich Kohl geerntet, der direkt beispielsweise zu Sauerkraut oder Tiefkühlware weiterverarbeitet wird (Krug et al., 2002).

2.2 Probleme der Beikrautregulierung

Was als Unkraut beziehungsweise Beikraut gilt, ist weniger durch botanische Arten festgeschrieben, sondern wird vielmehr durch das Produktionsziel, das Ertragsniveau des Kulturpflanzenbestands, die Populationsdichte und Einzelpflanzengröße der Beikräuter und gegebenenfalls auch deren Nutzen bestimmt (Krug et al., 2002).

Im ökologischen Gemüsebau führen vorwiegend einjährige, spätkeimende, sommerannuelle Beikräuter wie Portulak (*Portulaca oleracea*), Knopfkräuter (*Galinsoga* spp.), allen voran das Franzosenkraut (*Galinsoga parviflora*), Amaranarten (*Amaranthus* spp.) und Schadhirsen zu Problemen (Zwerger und Ammon, 2002; Niggli und Dierauer, 2000). Jene sogenannte Spätfrühjahrskeimer bevorzugen hohe Temperaturen und sind deshalb besonders häufig in Kulturen anzutreffen, bei denen während des späten Auflaufens des Beikräuter noch keine geschlossene Pflanzendecke vorzufinden ist, wie dies Hackfrüchten und vielen Gemüsekulturen der Fall ist (Krug et al., 2002). Aber auch ausdauernde Beikräuter wie Winden (*Convolvulus* spp., z.B. Acker-Winde und Echte Zaunwinde), die Gemeine Quecke (*Elymus repens*), Distel-Arten (*Cirsium* spp.) oder die Wilde Sumpfkresse (*Rorippa sylvestris*) sind, vor allem bei vernachlässigter Pflug- und Bodenbearbeitung, teilweise von großer Bedeutung (Zwerger und Ammon, 2002). Darüber hinaus ist der sommerannuelle Weiße Gänsefuß (*Chenopodium album*) ein im ökologischen Gartenbau sehr häufig auftretendes Problembeikraut (Plagge, 2000).

Nichtsdestotrotz können die problematischen Beikräuter von Schlag zu Schlag variieren, da vor allem das Auflaufen einjähriger Beikrautarten stark von den Bewirtschaftungsumständen der Vergangenheit abhängt (Zwenger und Ammon, 2002). Außerdem wird das Artenspektrum der vorkommenden Beikräuter durch die Standortbedingungen wie beispielsweise die Bodenstruktur, den pH-Wert des Bodens sowie die Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit bedingt (Krug et al., 2002). Während beispielsweise Quecken vor allem auf leichten Standorten problematisch sind, tritt Franzosenkraut vermehrt auf humosen Böden, aber auch im geschützten Anbau auf (Plagge, 2000). Prinzipiell stellen in intensiv bewirtschafteten Gemüsebaubetrieben mit der üblichen Bodenbearbeitungshäufigkeit annuelle Beikräuter meist größere Probleme dar als perennierende (Zwenger und Ammon, 2002). Das ist dadurch begründet, dass die Dauer ungestörten Bodens, welche zur Bildung vegetativer Vermehrungsorgane und zur Speicherung von Reservestoffen bei perennierenden sogenannten Wurzelunkräutern benötigt wird, auf intensiv genutzten Gemüsebauflächen nicht ausreicht (Krug et al., 2002). Samenunkräuter, welche auf generative Vermehrung spezialisiert sind, benötigen für deren Ansiedelung und Vermehrung lediglich das Erlagen der Samenreife, beispielsweise im Zuge tolerierter Spätverunkrautung, und sind daher besser an die Produktionsbedingungen im Gemüsebau angepasst (Krug et al., 2002). Besonders Beikräuter mit einer sehr kurzen Entwicklungsdauer von nur wenigen Monaten wie beispielsweise das Franzosenkraut (*Galinsoga ciliata*) sind ausgezeichnet an den Gemüsebau angepasst. Sie können selbst in kurzlebigen Kulturen, die in der Fruchtfolge eigentlich das konkurrenzstärkere und das Unkrautpotenzial eindämmende Glied darstellen, zur Samenreife gelangen.

Ein Grund für die Problematik von Beikräutern im Gemüsebau ist die relativ geringe Bestandesdichte. Diese ist unvermeidbar und wird meist absichtlich gewählt, damit die Ernteorgane die marktkonforme Größe erreichen können. Das bedeutet jedoch auch, dass eine starke Verunkrautung bei nicht ausreichend effektiver Regulierung qualitätsmindernd auf die Größe des Ernteorgans auswirken kann und im schlimmsten Fall nicht mehr den Vermarktungskriterien entspricht. Hier liegt der große Unterschied zu Ackerfrüchten, wo durch Verunkrautung oder höhere Bestandesdichten, wie sie im biologischen Anbau im Sinne der Beikrautregulierung gewählt werden, lediglich quantitative Verluste entstehen (Krug et al., 2002).

Organische Düngemittel haben, verglichen mit mineralischen Düngern, eine langsamere Nährstofffreisetzung (Melander et al., 2005). Dies verzögert das Auflaufen von Beikräutern und den Zeitpunkt der Nährstoffkonkurrenz zwischen Nutzpflanze und Beikräutern und führt

auch zu einer daran angepassten Beikrautflora (Melander et al., 2005). Die Beikrautregulierung in der Reihe stellt im ökologischen Gemüsebau ein besonderes Problem dar, da die mechanischen Maßnahmen hauptsächlich zur Beikrautbeseitigung zwischen den Reihen und nur ungenügend für den Einsatz in der Reihe geeignet sind (Plagge, 2000). So werden beim Anbau von Zwiebeln beispielsweise 10 bis 33 Prozent des Reihenbereichs nicht durch mechanische Maßnahmen erfasst (Laber und Stützel, 2003). Auf diesen Stellen können Unkräuter nur manuell beseitigt werden. Allerdings können gerade diese Beikräuter in den Reihen den Ertrag negativ beeinflussen, wie Heisel et al. (2002) bei Zuckerrüben zeigten. Da Zwiebelgemüse die Ernteorgane genauso wie Zuckerrüben unter der Erde bilden, ist damit zu rechnen, dass auch bei Zwiebelgemüse die Verunkrautung in der Reihe ertragswirksame Einflüsse haben kann.

In kleineren ökologischen Gemüsebaubetrieben werden aus pflanzenschutztechnischen Gründen häufig Insektenschutznetze über den Kulturen ausgebracht. Diese müssen bei jeglicher Bodenbearbeitung so entfernt werden, dass weder Kultur noch Netz Schaden nehmen. Dieses Abnehmen der Netze sowie die anschließende Wiederabdeckung sind zeitaufwendig. Wenn der Pflanzenschutz von ökonomisch größerer Bedeutung ist, wie dies bei Kohlgemüse der Fall sein kann, kann es aus zeittechnischen Gründen zu einer problematischen Vernachlässigung der Beikrautregulierung kommen (Plagge, 2000).

Die Wirkung physikalischer Beikrautregulierung ist weniger langanhaltend verglichen mit Herbiziden und kann außerdem auch die Verbreitung von Beikräutern anregen (Melander et al., 2005). Dies macht eine wirkungsvolle, nicht-chemische Beikrautregulierung besonders anspruchsvoll.

2.2.1 Beikrautregulierungsprobleme beim Anbau von Zwiebelgemüse

Bei Zwiebelgemüse ist die Beikrautregulierung besonders anspruchsvoll, da dieses nicht sehr konkurrenzstark gegenüber Beikräutern ist. Dies ist dadurch bedingt, dass es bei Zwiebeln genauso wie bei Lauch durch den aufrechten Wuchs nicht zu einem unkrautunterdrückenden Reihenschluss kommt, wie dies beispielsweise bei Kohl der Fall ist (Melander et al., 2005). Ein weiterer Grund für diese niedrige Konkurrenzkraft ist die langsame Jugendentwicklung. Die Tatsache, dass es beim Anbau von Sätzwiebeln ohne effektive Regulierungsmaßnahmen der Beikräuter zu Totalausfällen kommen kann (Krug et al., 2002), bestätigt die hohe Bedeutung der Beikrautregulierung bei Zwiebelgemüse.

Eine wie bei Kohlgemüse übliche, niedrige Spätverunkrautung kann nicht toleriert werden, da diese bis zum Ende der Kulturzeit zu Konkurrenzsituationen führen könnte oder Beikräuter aussamen könnten (Laber, 2009).

Bei Schnittlauch, einem weiteren Zwiebelgewächs, kommt hinzu, dass Beikräuter zu Verunreinigungen im Erntegut führen und somit die Qualität mindern können. Dadurch kommt es zu erhöhtem Sortieraufwand beziehungsweise entspricht das Erntegut im schlimmsten Fall nicht mehr den entsprechenden Vorgaben und wird vom Handel nicht mehr abgenommen (Zwenger und Ammon, 2002).

Die Beikrautregulierung im Lauchanbau ist insofern herausfordernd, da die Blätter nicht versehrt werden dürfen. Das würde die Qualität beeinflussen und somit finanzielle Auswirkungen nach sich ziehen (Zwenger und Ammon, 2002).

Eine erfolgreiche Beikrautregulierung ist beim Zwiebelgemüse unter anderem auch aufgrund des Einsatzes von Erntemaschinen von großer Bedeutung. Die maschinelle Ernte kann durch starke Verunkrautung beeinträchtigt werden. Es kann sowohl zu Zeiteinbußen als auch zu Qualitätsverlusten kommen, wenn das Erntegerät nicht exakt arbeiten kann. Vor allem krautige, aber auch verholzte Beikräuter wie beispielsweise *Amaranthus* ssp. können Erntemaschinen verstopfen ebenso wie eine manuelle Ernte verlangsamen (Zwenger und Ammon, 2002).

Ebenso wie bei der Direktsaat von Zwiebeln, können übermäßig viele Steine auch Probleme bei der thermischen und mechanischen Beikrautregulierung verursachen (Koller et al., 2007).

2.2.2 Beikrautregulierungsprobleme beim Anbau von Kohlgemüse

Verglichen mit Zwiebelgemüse ist die Beikrautregulierung beim Anbau von Kohlgemüse von etwas geringer Bedeutung. Bei unterlassener Beikrautregulierung betragen die Ertragsverluste durchschnittlich 32 Prozent (Laber, 1999). Eine andere Studie aus dem Jordantal (Quasem, 2009) belegt dagegen eine Reduktion des Kopfgewichts von Karfiol um 81% unter nicht regulierten Bedingungen. Dieser große Unterschied kann beispielsweise durch variierende Angebotsverhältnisse erklärt werden. Bei hohem Wasser- und Nährstoffangebot führt eine Konkurrenzsituation zu weniger starken Verlusten als in Mangelsituationen.

Kohlgemüse gilt prinzipiell als recht konkurrenzfähig, jedoch erst ab einem gewissen Entwicklungsstadium, in welchem es durch Beschattung die Keimung und das Wachstum von Beikräutern minimiert (Quasem, 2009). Laut Melander et al. (2005) sowie Laber (2009) hat

Kohlgemüse ab etwa der Mitte der Vegetationszeit genügend Konkurrenzkraft, um Beikräuter zu unterdrücken. Quasem (2009) hat für Karfiol eine kritische Periode, in welcher noch keine ausreichende Konkurrenzfähigkeit gegenüber Beikräutern besteht und eine Verunkrautung den Ertrag entscheidend beeinflusst, von 0 bis 38 Tage errechnet. Am wichtigsten stellte sich allerdings die Beikrautregulierung in den ersten 14 Tagen nach dem Auspflanzen heraus (Quasem, 2009). Kann eine Verunkrautung in den ersten 14 Tagen verhindert werden, sinkt die Gesamtverunkrautung letztendlich um 88%. Diese Ergebnisse aus dem Jordantal sind allerdings mit Vorsicht auf mitteleuropäische Klima- und Niederschlagsverhältnisse zu übertragen.

2.3 Kulturtechnische Maßnahmen und Prävention

Die in diesem Kapitel beschriebenen Maßnahmen dienen indirekt der Vermeidung des Eintrags von Beikrautsamen und vegetativen Vermehrungsorganen sowie der generativen und vegetativen Verbreitung von Beikräutern. Jede Maßnahme einzeln hat nur bedingte Relevanz, aber alle Maßnahmen in ihrer Gesamtheit haben einen bedeutenden Einfluss auf den Unkrautdruck und die Konkurrenzkraft der Kulturpflanzen (Zwinger und Ammon, 2002). Gerade in der ökologischen Landwirtschaft, wo der Beikrautbekämpfung oft nur relativ ineffiziente mechanische, ressourcenintensive physikalische oder kostenintensive manuelle Maßnahmen zur Verfügung stehen, sind die präventiven Maßnahmen von besonderer Bedeutung (Köpke, 2000). Ein Beweis für die Effizienz der einzelnen Maßnahmen liegt in vielen Fällen nicht vor (Melander et al., 2005), da die Zahl der Studien in diesem Bereich sehr niedrig ist.

2.3.1 Verhinderung des Ausbreitens von Beikräutern

Ab einem bestimmten Entwicklungsstadium, in welchem die Kultur bereits relativ konkurrenzfähig gegenüber Beikräutern ist, ist eine Spätverunkrautung üblicherweise tolerierbar (Zwinger und Ammon, 2002), bei Kohl beispielsweise ab ungefähr der Mitte der Kulturzeit (Laber, 2009). Wird Spätverunkrautung allerdings zu früh toleriert, weil beispielweise mechanische Bekämpfungsmaßnahmen wegen zu dichtem Pflanzenbestand schwierig und manuelle Maßnahmen ökonomisch nicht rentabel sind, kann es allerdings zum Aussamen der tolerierten späten Beikräuter kommen (Plagge, 2000). Das erhöht die Samenbank und somit den Unkrautdruck der nachfolgenden Jahre erheblich (Plagge, 2000). Außerdem kann Spätverunkrautung großen Einfluss auf den Ernteertrag haben (Laber, 1999). Vergleiche

zwischen betriebsüblichem Jäten im Zwiebelanbau und unkrautfreiem Anbau ergaben Ertragsverluste von durchschnittlich 18 Prozent (Laber, 1999). Eine Spätverunkrautung kann jedoch auch zu einer verbesserten Bodengare führen und somit die Erträge steigern, bei Lauch beispielsweise um etwa 10 Prozent (Zwerger und Ammon, 2002).

Bei der Betrachtung des Eintrags von Beikrautsamen oder vegetativen Organen muss auch der Einfluss von Feldrändern und Felddrainen beachtet werden. Bei Letzteren gilt das Mähen und Mulchen vor der Samenreife der vorkommenden Beikräuter als wichtige Maßnahme (Laber, 2009). Das Eindringen von Wurzelbeikräutern kann durch eine Bearbeitung mit der Kreiselegge an Feldrändern minimiert werden.

Zur Bekämpfung von Wurzelunkräutern beispielsweise durch eine Bodenbearbeitung mit Grubber sollten jene maximal 10 cm hoch beziehungsweise erst höchstens im 4-Blatt-Stadium sein (Laber, 2009). Zu diesem Zeitpunkt sind die Reservestoffvorräte in den Wurzel- und Rhizomen noch nicht so hoch und ein Neuaustrieb wird eingeschränkt.

Durch das Säubern von Maschinen und Geräten nach der Ernte oder Bodenbearbeitung eines verunkrauteten Schlags lässt sich die Verbreitung von Unkrautsamen und Vegetationsorganen über die gesamte Betriebsfläche vermeiden (Zwerger und Ammon, 2002). Bei dem Einsatz von künstlicher Bewässerung hilft das Filtern des Bewässerungswassers gegen den Eintrag von Beikräutern (Pannacci et al., 2017).

Auch gute Kompostqualität (siehe Kapitel 2.3.4) trägt dazu bei, dass weniger Beikrautsamen eingetragen werden, der Beikrautdruck abnimmt und somit weniger Aufwand für Maßnahmen gegen deren vegetative und generative Ausbreitung entsteht.

2.3.2 Fruchtfolge, Zwischenfrüchte, Untersaat und Mischkultur

Von allen indirekten Maßnahmen zur Prävention von Beikräutern ist die Fruchtfolge von besonderer Bedeutung (Pallutt, 2000). Andersherum formuliert, können sich Fehlentscheidungen in der Gestaltung der Fruchtfolge sehr problematisch auf die Beikrautregulierung auswirken (Plagge, 2000). Ziel der Fruchtfolge u.a. ist es, der Entwicklung einer dominanten Beikrautspezies entgegenzuwirken (Pannacci et al., 2017). Mit der Rotation der Kulturen gelingt es keiner Beikrautspezies, sich an eine bestimmte Kulturart so gut anzupassen, dass deren Regulierung zu Schwierigkeiten führen könnte (Pannacci et al., 2017). Stattdessen bewirkt eine gute Fruchtfolge die Bildung einer vielfältigen Beikrautflora mit wenig spezialisierten, konkurrenzschwachen, leichter regulierbaren Beikräutern (Pannacci et al.,

2017; Liebman et al., 2001). Das ist unter anderem durch die Vielfalt der Bearbeitungsmaßnahmen zu erklären. Eine zur Beikrautregulierung beitragende Fruchtfolge im Gemüsebau umfasst beispielsweise den Wechsel zwischen Blatt-, Wurzel-, Frucht- und Zwiebelgemüse (Pannacci et al., 2017). Es gilt das Prinzip, konkurrenzstarke und konkurrenzschwache Gemüsearten immer im Wechsel anzubauen, damit konkurrenzschwache Kulturen nicht auf stark verunkrauteten Feldern wachsen und der Unkrautdruck dort noch weiter anwächst (Laber, 2009). Sofern es die betrieblichen Voraussetzungen zulassen, sollten gemüsebaulich genutzte Flächen zwischendurch mit Getreide bestellt werden, da die an den Hackfruchtanbau angepassten Beikräuter durch den Anbau von Halmfrüchten in ihrer Entwicklung und Verbreitung gehemmt werden (Pannacci et al., 2017). Wirtschaftliche Zwänge zum Anbau von bestimmten Marktfrüchten stehen einer ausgewogenen Fruchtfolge allerdings häufig im Weg (Tei und Pannacci, 2008).

Der Anbau von Zwischenfrüchten zur Gründüngung bewirkt neben seinem positiven Einfluss unter anderem auf die Bodenstruktur sowie die Humus- und Nährstoffbilanz ebenfalls eine Unterdrückung von Beikräutern (Krug et al., 2002). Zum einen durch die Konkurrenzsituation während des Zwischenfruchtanbaus und des Weiteren durch die Freisetzung allelopathischer Substanzen während und im Anschluss an den Zwischenfruchtanbau (Ciaccia et al., 2015). Besonders für erstere Wirkung sind Zwischenfrüchte geeignet, die sich rasch entwickeln und dicht wachsen (Davies und Lennartsson, 2008). Damit entsteht für Beikräuter ein Mangel an Licht, was zu einer Keim- und Entwicklungshemmung führt (Davies und Lennartsson, 2008). Buchanan et al. (2016) bestätigen, dass es die Menge an Biomasse ist, die die erwünschte Beikrautunterdrückung herbeiführt und die Spezies der Zwischenfrucht weniger von Bedeutung ist. Das ist folglich ein positiv hervorzuhebender Aspekt, weil bei der Wahl der Zwischenfrucht dann auf allelopathische Effekte mit den Kulturen der Fruchtfolge geachtet werden kann. Buchanan et al. (2016) kommen allerdings auch zu dem Schluss, dass Zwischenfrüchte nur die Beikrautdichte, nicht jedoch die Samenbank reduzieren. Eventuell ist dies jedoch durch eine langjährige Durchführung dieser Technik erreichbar.

Auch Zwischenfrüchte, die sich langsamer entwickeln wie beispielsweise Klee, eignen sich im mehrjährigen Anbau hervorragend zur Unkrautunterdrückung. Ihre Integration im Gemüsebau ist beispielsweise in Form von Untersaatsystemen, in Mulch-/Kompostierungssystemen oder bei gemischten Betriebssystemen in Form von Feldfutterbau möglich. Allerdings variiert der Bekämpfungserfolg des Zwischenfrucht- bzw. Feldfutteranbaus beispielsweise mit Klee je nach problematischer Beikrautspezies. Während Ackerkratzdisteln gut bekämpft werden

können, kann der Feldfutteranbau bei Löwenzahn sogar zur Verbreitung führen (Heuberger, 2015). Bezüglich der Robustheit ist allerdings anzumerken, dass diese Maßnahme stark vom Niederschlag beziehungsweise den örtlichen Wasservorkommen abhängig ist. In niederschlagsarmen Gebieten oder Regionen mit hohen Wasserkosten ist der Anbau von Zwischenfrüchten deshalb problematisch oder sorgt mit weniger dichten Beständen nicht für die gewünschte Beikrautunterdrückung (Tei und Pannacci, 2008). Zusätzlich dazu variiert die Wirkung von Zwischenfrüchten je nach gewählter Pflanzenart, Beikrautflora und Management (Melander et al., 2005).

Um mithilfe der Fruchtfolge eine wirkungsvolle Beikrautunterdrückung zu erreichen, hat sich ein Anteil von mindestens 20% ein- oder mehrjähriger Zwischenfrüchte bewährt (Laber, 2009). Es hat sich erwiesen, dass im ersten Jahr nach dem Umbruch einer mehrjährigen Zwischenfrucht halb so viele Beikräuter auftreten wie drei Jahre danach (Davies und Lennartsson, 2008). Aus diesem Grund eignen sich diese gerade umgebrochenen Parzellen besonders gut für konkurrenzschwache Gemüsearten. Bei schwachzehrenden Zwiebeln, auf welche dieser Fall zutreffen würde, ergäbe sich jedoch je nachdem welche Pflanzenart als mehrjährige Zwischenfrucht angepflanzt wird, ein Nährstoffüberschuss.

Doch der Zwischenfruchtanbau kann bezüglich der Beikrautunterdrückung auch zu unerwünschten Nebenwirkungen führen. So können dormante Samen, Herbstkeimer oder perennierende Arten gefördert werden. Unabhängig von der Beikrautregulierung kann der Zwischenfruchtanbau dazu führen, dass viel Bodenwasser gebunden wird und nicht mehr für die Keimung der Folgekultur zur Verfügung steht. Außerdem können große Gründünungsmassen, wenn sie zur falschen Zeit eingearbeitet werden, die Durchwurzelung der nachfolgenden Kultur beeinträchtigen (Krug et al., 2002).

Bei bereits bestehendem Unkrautdruck in der Zwischenfrucht, kann der sogenannte Schröpfungsschnitt noch zum Einsatz kommen. Dabei werden bereits höher gewachsene Unkräuter in sich langsam entwickelnden oder niedrigeren Zwischenfrüchten, wie beispielsweise Klee, abgeschnitten werden, ohne dass jedoch die Zwischenfrucht gemäht wird. Die Zwischenfrucht kann gegenüber den Beikräutern dadurch gestärkt werden (Laber, 2009).]

Der bereits erwähnte weitere beikrautregulierende Effekt der Zwischenfrüchte ist die Freisetzung von allelopathisch wirkenden Substanzen. Ein Versuch mit Winterroggen, Winterraps und Luzerne zeigte, dass in allen drei Zwischenfruchtarten allelopathische Wirkung vorliegt, die nach der mechanischen Schädigung der Pflanzen signifikant ansteigt. Ein

möglichst geringer Verlust an Biomasse bei der Aufbereitung und Einarbeitung der Zwischenfruchtreste gewährt die beste Wirkung. Zwischen den drei getesteten Pflanzenarten bestanden Unterschiede in der Beikrautunterdrückung bezüglich Beikrautart und wirkungsvollster Aufbereitungsart. Allgemein wurde festgestellt, dass ein starker Niederschlag nach dem Einarbeiten die Freisetzung der allelopathischen Substanzen begünstigt und zu einer starken Unterdrückung einiger Beikrautarten führte (Kruidhof und Bastiaans, 2007).

Untersaat

Unter anderem bei Kohlgemüse und Lauch haben sich mittlerweile auch schon Untersaaten bewährt (Ökolandbau, 2017). Die rasch wachsende, dichte Untersaat bedeckt den Boden und hemmt Beikräuter in ihrer Entwicklung (Davies und Lennartsson, 2008). Zudem dienen Untersaaten als Futteralternative für Pflanzenschädlinge und können die Nährstoffauswaschung minimieren (Zwinger und Ammon, 2002). Zu letzterem eignen sich vor allem Leguminosen, welche je nach Stickstoffverfügbarkeit diesen im Boden binden oder produzieren können und somit keine Nährstoffkonkurrenten für die Hauptkultur darstellen (Davies und Lennartsson, 2008). Allerdings können auch Leguminosen-Untersaaten trotz ihrer Vorteile durch die Stickstofffixierung und Beikrautunterdrückung eine beträchtliche Konkurrenz zur Kultur darstellen, wie Ebrahimi et al. (2016) dies beispielsweise für Lauch mit einer Kleeuntersaat (*Trifolium repens* L.) konstatiert.

Der Zeitpunkt für die Aussaat der Untersaat muss wohl überlegt sein, da die Untersaat weder der Kulturpflanze in der Anfangsentwicklung Konkurrenz machen soll, aber auch rechtzeitig den Boden bedecken muss (Laber, 2009). Bei späterer Aussaat sind im Vorhinein noch mechanische Beikrautregulierungsmaßnahmen möglich, aber eine rasche Bedeckung durch die Hauptkultur beispielsweise bei Kohlgemüse kann den Aufwuchs der Untersaat auch durch Lichtmangel beeinträchtigen (v. Fragstein und Niemsdorff, 2014). Laut Krug et al. (2002) ist dieser Kompromiss zwischen erfolgreicher Bodenbedeckung und gleichzeitiger Verhinderung der Konkurrenz zur Kulturpflanze in der Praxis nicht umsetzbar. Nicht praktikable Schnittmaßnahmen der Untersaat wären notwendig, um zu verhindern, dass eine Konkurrenzsituation zu Einbußen in der Größe des Ertragsorgans führt und somit den Vorgaben des Handels nicht mehr entspricht (Krug et al., 2002). Ebrahimi et al. (2016) zufolge hat ein Schnitt von Klee keinen großen Einfluss auf den Schaftdurchmesser von Lauch, im Gegensatz zum Aussaatzeitpunkt. Die höchsten Schaftdurchmesser wurden bei der Versuchsvariante mit der späten Kleeaussaat 48 Tage nach dem Pflanzen erzielt (Ebrahimi et al., 2016). Bei von

Fragstein und Niemsdorff (2014) ergab eine Weißkleeaussaat vier Wochen nach der Pflanzung sowohl bei Lauch als auch bei Blumenkohl je nach Sorte vergleichbare oder sogar höhere Erträge als die Kontrolle ohne Untersaat. Neben Weißklee haben sich auch Serradella und Tagetes als Untersaaten bei Lauch bewährt (Adamczewska-Sowinska et al., 2009). Spätere Aussaattermine (7 oder 9 Wochen nach dem Pflanzen von Lauch) führten zu höheren Laucherträgen als Aussaaten 3 oder 5 Wochen nach dem Pflanzen von Lauch (Adamczewska-Sowinska et al., 2009).

In Weißkohl erwiesen sich zwei Kleespezies (*Trifolium repens* L. und *T. subterraneum* L.) sowohl zur Beikrautregulierung zwischen als auch in der Reihe als effektiv (Robačar et al., 2016). Die Zwischenreiheneinsaat mit Italienischem Ryegrass (*Lolium multiflorum*) im Kohlanbau stellte sich als vergleichbar wirkungsvoll wie das Abflammen und die gehackte Kontrolle heraus (Orzolek et al., 1996). Allerdings betonen auch Orzolek et al. (1996) genauso wie Montemurro et al. (2016) die Bedeutung des richtigen Zeitpunkts für die Einsaat der Untersaat, welcher von vielen Faktoren abhängt. Die Einsaat von Rauhem Schneckenklee (*Medicago polymorpha* L. var. *anglona*) drei Wochen nach der Pflanzung hat in Bezug auf das Kopfgewicht von Karfiol in Italien die besten Resultate ergeben (Montemurro et al., 2016).

Bei spät geernteten Kulturen wie beispielsweise späten Kohlgemüsearten oder Lauch stellt die Untersaat neben der Beikrautregulierung auch die einzige Möglichkeit für eine Bodenbedeckung im Winter dar und kann somit vor allem auf nährstoffreichen Standorten der winterlichen Auswaschung entgegenwirken (Zwerger und Ammon, 2002). Wenn es sich bei der Untersaat allerdings um eine winterharte, nicht abfrierende Pflanzenart handelt, kann die Bodenbearbeitung im Frühjahr durch das schlechter abtrocknende Feld verzögert werden oder ein erhöhter Schneckenbefall in der Nachkultur auftreten (Zwerger und Ammon, 2002).

Finney et al. (2009) untersuchten die Eignung von Sudangras (*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *sorghum sudanense*) als Zwischenfrucht vor und anschließend nicht umgebrochene Untersaat in Herbstkohl, welche gleichzeitig der Verwertung als Heu dienen sollte, in Bezug auf Kopfgewicht und Beikrautunterdrückung. Das Abführen des Heus im Vergleich zum Belassen als Mulch hatte keinen Einfluss auf die Unkrautunterdrückung, im Gegenteil zur Häufigkeit des Mähens. Das Sudangras hat sich aufgrund der hohen Wüchsigkeit im Kohl, verglichen mit der Kontrolle ohne vorangegangene Zwischenfrucht, negativ auf das Kopfgewicht ausgewirkt und daher nicht bewährt. Nichtsdestotrotz scheint die Kombination einer Zwischen- bzw. Untersaat zur Heuproduktion und der Kohlproduktion eine gute beikrautunterdrückende Anbaumethode

zu sein (Finney et al., 2009). Weitere Versuche dazu könnten andere, besser adaptierte Untersaatkulturen identifizieren.

Es lässt sich also feststellen, dass Untersaaten zwar sehr wirkungsvoll sein können, aber bezüglich der Konkurrenz auch ein Ertragsrisiko darstellen können. Das ideale Datum zur Einsaat ist multifaktoriell bedingt und muss standortspezifisch angepasst werden. Generell kann allerdings gefolgert werden, dass das zeitliche Management von Untersaaten bei Pflanzkulturen leichter ist als bei Saatkulturen. Bei der Auswahl der Untersaat ist neben der Winterhärte bei Untersaaten, die im Anschluss an die Ernte als Winterzwischenfrucht bestehen bleiben sollen, auch deren Wüchsigkeit eine Betrachtung wert. Denn das Risiko eines verminderten Ertrags durch Konkurrenz sinkt, wenn die Kultur eine höhere Wüchsigkeit aufweist als die Untersaat. Gerade in Bezug auf letzten Aspekt, aber auch als typische Pflanzkultur ist Kohlgemüse eine Kultur, bei der sich Untersaaten bereits als effektive Maßnahme gegen Beikräuter bewiesen haben. Finanziell und arbeitstechnisch ist der Mehraufwand durch eine Untersaat relativ gering, weshalb es sich bei gegebener Effektivität um eine effiziente Maßnahme handelt. Auch die angeführten Ergebnisse im Lauchanbau lassen auf die Eignung der Untersaat als effiziente Beikrautregulierungsmaßnahme vor allem in gepflanztem Zwiebelgemüse schließen. Allerdings setzt eine effektive Untersaat einen niedrigen Unkrautdruck voraus (Laber, 2009).

Mischkultur

Neben der Kombination von Hauptkultur und Untersaaten sind im Gemüsebau auch Mischkulturen, also der parallele Anbau zweier Hauptkulturen, möglich (Melandar et al., 2005), allerdings bei weitem weniger erforscht. Beispielsweise bei der Kombination von Lauch und Sellerie hat sich eine erhöhte Konkurrenzkraft gegenüber Beikräutern und eine reduzierte Aussamung spätkeimender Unkräuter gezeigt (Zwenger und Ammon, 2002). Sowohl in dieser Mischkultur als auch in der Kombination mit einer Untersaat konnte ein reduzierter Befall mit Zwiebelthripsen (*Thrips tabaci*) im Anbau von Lauch nachgewiesen werden (Zwenger und Ammon, 2002). Auch Baumann et al. (2000) wiesen beim gemeinsamen Anbau von Lauch und Sellerie eine um 41 Prozent reduzierte Verunkrautung und einen um zehn Prozent gesteigerten Ertrag im Vergleich zum klassischen Monokulturanbau nach.

Die Kombination von Brokkoli und Roggen, welcher bei der letzten mechanischen Beikrautregulierung eingesetzt wurde, erwies sich bei Brainard und Bellinder (2004) als schwierig, da es entweder zu Ertragseinbußen kam oder der Effekt der Beikrautregulierung zu

wünschen übrigließ. Man folgerte daraus, dass andere Versuchsbedingungen wie eine höhere Saatkichte, andere Gebiete oder Jahreszeiten ein besseres Ergebnis erbringen könnten.

2.3.3 Bodenbearbeitung, Saat- bzw. Pflanzbettvorbereitung und Saat

Die Bodenbearbeitung hat zum Ziel, dass der Boden vor dem Kulturstart frei von Unkraut und Ernterückständen ist und eine exakte Reihenablage der Saat oder der Pflanzung möglich ist (Laber, 2009). Diese genaue, geradeverlaufende Reihensaat beziehungsweise -pflanzung mit gleichmäßigem Reihenabstand und Ablagetiefe ist Voraussetzung dafür, dass mechanische Beikrautregulierung erfolgsversprechend durchgeführt werden kann (Kress, 1990). Ein feines, ebenes Saatbett sowie eine präzise Saat beziehungsweise Pflanzung beeinflussen einerseits die mechanische Beikrautregulierung positiv, weil näher an der Kulturpflanze gehackt werden kann und Geräte ihre Wirkung nicht stellenweise durch Unebenheiten verlieren (Laber, 2009). Genauigkeit bei der Saatbettvorbereitung und Saat beziehungsweise Pflanzung ermöglichen ein scharfes Hacken näher an der Kulturpflanze und verringern somit den ungehackten Bereich neben der Reihe (Plagge, 2000). Andererseits wirkt es sich auch auf den Erfolg thermischer Verfahren aus, da keine Keimlinge von Kluten geschützt werden (Laber, 2009). Im Falle einer Saat, was in dieser Arbeit nur die Zwiebel betrifft, kann das Andrücken mit einer Walze das Verschlämmen der Saat und somit das Entstehen ungerader Reihen verhindern (Kress, 1990). Eine Bewässerung bei der Saat oder Pflanzung kann hilfreich sein, damit die Saat gleichmäßig rasch aufgeht beziehungsweise die Setzlinge zügig anwachsen und anschließend der Striegel früher zum Einsatz kommen kann (Haber, 2009). Die Bewässerung sollte zugunsten der Wettbewerbsfähigkeit der Kulturpflanze durchgeführt werden (Tei und Pannacci, 2008). Beispielsweise würde im Boden verlaufende Tröpfchenbewässerung die Beikrautsamen, die näher an der Bodenoberfläche liegen, benachteiligen und dadurch zur Beikrautregulierung beitragen. Im Fall von trockenem Oberboden in eher trockenen Regionen begünstigt eine tiefere Saat großsamiger Kulturen die Wasserverfügbarkeit und somit auch die Wettbewerbsfähigkeit der Kulturpflanze gegenüber Beikrautsamen, welche sich in höheren Bodenschichten befinden (Pannacci et al., 2017). Dies lässt sich bedingt auch auf die Pflanzung von Kohlgemüse-, Zwiebel- und Lauchsetzlingen übertragen. Je tiefer diese in trockenen Gebieten gepflanzt werden, desto besser ist deren Wasserversorgung im Vergleich zu sich höher befindlichen Beikräutern oder Beikrautsamen.

Die Saat- beziehungsweise Pflanzung mithilfe einer automatischen Reihensteuerung beziehungsweise einer Saat- und Pflanzablage ist die Voraussetzung für GPS-basierte automatisch gesteuerte Beikrautregulierungsgeräte.

Die Entscheidung zwischen wendender und nicht-wendender Bodenbearbeitung ist von den Witterungsverhältnissen und dem Grad der Verunkrautung in der Vorfrucht abhängig (Pallutt, 2000). Bei niedrigem Unkrautbefall kann eine nicht-wendende Bodenbearbeitung die Verunkrautung weiter minimieren, da keine Unkräuter aus tieferen Bodenschichten nach oben transferiert werden (Zwenger und Ammon, 2002). Samen, die nicht in tiefere Bodenschichten transferiert werden, verlieren außerdem durch Austrocknung oder Tierraub ihr Schadpotenzial (Pannacci et al., 2017). Bei kleinsamigen Beikräutern sowie jenen mit kaum dormanten, kurzlebigen Samen besteht jedoch bei nicht wendender Bodenbearbeitung die Gefahr einer raschen Ausbreitung (Pannacci et al., 2017).

Stärkere Verunkrautung ist bei feuchten Witterungsbedingungen nur durch eine wendende Bodenbearbeitung einzudämmen (Zwenger und Ammon, 2002). Ein Ziel der wendenden Bodenbearbeitung ist das Vergraben von Beikrautsamen in tiefe Bodenschichten, in welchen eine Keimung verhindert wird und die Samen, vor allem jene mit kurzer Lebensdauer, nach einer gewissen Zeit ihre Keimfähigkeit verlieren (Krug et al., 2002). Dies ist der große Vorteil des Pflugs gegenüber des Grubbers. Die Bodenbearbeitung mit dem Grubber reduziert Beikräuter, die sich vegetativ vermehren, durch deren Entwurzelung und Beförderung an die Bodenoberfläche. Da jedoch im ökologischen Gemüsebau die Regulierung von Samenbeikräutern im Vordergrund steht, hat sich der Pflug mit dem Vergraben von Samen, trotz seiner Nachteile bezüglich des Bodenlebens, bezüglich der Beikrautregulierung als effizienter erwiesen (Krug et al., 2002). Zwenger und Ammon (2002) betrachten den gezielten Einsatz des Pflugs ebenso als unumgänglich, um die Verbreitung ausdauernder Beikräuter zu verhindern beziehungsweise ein bereits problematisches Auftreten in den Griff zu bekommen.

Alle Maßnahmen, mit denen eine Umlagerung des Bodens einhergeht, regen jedoch auch die Keimung von Samen in den oberen Bodenschichten an (Krug et al., 2002). Vor allem Beikrautarten, die über langlebige Samen mit sekundärer Dormanz verfügen, werden durch das Vergraben im Zuge der wendenden Bodenbearbeitung nicht eliminiert und bei späteren Pflugeinsätzen wieder zur Keimung angeregt (Pannacci et al., 2017). Je nachdem, wie hoch die Samenbank in den tieferen Bodenschichten ist, kann dies ein mehr oder weniger großes Problem darstellen. In diesem Fall bietet das Abflammen, bei dem durch das Unterlassen der mechanischen Bearbeitung nicht erneut Beikrautsamen zum Keimen angeregt werden, eine Lösung.

Ein weiteres Ziel der Bodenbearbeitung ist die Beseitigung vegetativer Vermehrungsorgane. Mit deren Beförderung an die Bodenoberfläche vertrocknen sie und sterben ab (Krug et al.,

2002). Bodenbearbeitung kann aber auch zur Zerstückelung von vegetativen Vermehrungsorganen führen, wodurch diese, sofern genügend Reservestoffe eingelagert sind, sich weiterverbreiten können (Zwerger und Ammon, 2002).

Auf schweren Böden sorgt das Pflügen im Herbst für eine gute Frostgare und ein rasches Abtrocknen, vor allem bei Getreide als Vorfrucht. Das ist für den Anbau von Frühlkohl oder frühem Blumenkohl von großer Bedeutung. Auf leichten Böden ist das Pflügen zur Bodenvorbereitung von weniger Bedeutung und kann, vor allem bei stickstoffreichen Vorfrüchten, sogar zum Auswaschen von großen Mengen Stickstoff führen (Krug et al., 2002).

Buchanan et al. (2016) konnten mit Gerste beziehungsweise Klee oder einer Mischung aus beidem als Winterzwischenfrucht, welche nur flach abgemäht wurde, eine gute Beikrautunterdrückung (50%ige Reduktion des Beikrautbesatzes) mit reduziertem Pflugeinsatz (strip tillage) beispielsweise in Brokkoli erreichen. Dieses Ergebnis ist natürlich nur begrenzt übertragbar, weil die auftretenden Beikräuter (Samen- oder Wurzelbeikräuter) eine große Rolle spielen. Es ist außerdem anzumerken, dass nur der Beikrautbesatz, nicht jedoch die Samendichte reduziert werden konnte (Buchanan et al., 2016). Erstaunlich ist, dass die bearbeiteten Reihen eine niedrigere Verunkrautung aufwiesen als die nicht bearbeiteten, obwohl andere Studien (Brainard et al., 2013) eher erwarten ließen, dass die Bearbeitung (disturbance) das Beikrautwachstum fördern würde. Brainard et al. (2013) führten als potenzielle Erklärung die Beschattung durch die Kultur an, allerdings ist die Beikrautdynamik in Strip-Tillage-Systemen sehr komplex, weshalb auch andere Gründe eingewirkt haben könnten.

2.3.4 Sortenwahl, Sortenqualität und Saattiefe bzw. Pflanzabstand

Bei der Sortenwahl sind im ökologischen Gemüsebau Ertragsleistung, Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und Schädlinge, Geschmack, Lager- und Standorteignung und noch einige weitere Faktoren zu berücksichtigen. Auch wenn die aufgezählten Komponenten die Auswahl der Sorten bereits schwierig machen, lohnt es sich, auch Acht auf schnelle Keimung, starke und rasche Wüchsigkeit sowie Wuchsbreite und -höhe zu geben (Davies und Lennartsson, 2008). Diese Merkmale sowie die Ausbreitung von Blättern und Wurzeln beeinflussen die Konkurrenzfähigkeit einer Kulturpflanze gegenüber Beikräutern (Davies und Lennartsson, 2008). Bei Versuchen zur Effizienz von Sorten mit guten Fähigkeiten zur Beikrautunterdrückung wurde ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 50 Prozent gegenüber Sorten mit extrem schwach ausgeprägter Beikrautunterdrückungsmerkmalen nachgewiesen (Niemann, 2000).

Untersucht wurden unterschiedliche Kulturarten, darunter auch Hackfrüchte wie Zuckerrübe und Kartoffel (Niemann, 2000). Je weitreihiger eine Kultur ist, desto eher wirkt sich die sortenspezifische Unkrautunterdrückung erst im Zuge der Spätverunkrautung aus (Niemann, 2000). Angesichts der Ertragsverluste und der Aussamungsgefahr, die von Spätverunkrautung ausgehen kann, ist dieser Effekt trotzdem nicht zu vernachlässigen (Laber, 1999). Um das Potenzial der Sortenwahl bezüglich der Beikrautregulierung vermehrt ausschöpfen zu können, wäre die Prüfung von Merkmalen wie Deckungsgrad, Wuchshöhe und Wachstumsgeschwindigkeit bei den Eignungstests im Zuge der Sortenzulassungsverfahren erstrebenswert (Niemann, 2000). Die Integration dieser Sorteneigenschaften in die beschreibenden Sortenlisten wäre von großer Bedeutung, um diese ergänzende und dabei völlig kostenfreie Maßnahme zur Beikrautregulierung besser nutzen zu können. Auch wenn Pannacci et al. (2017) Gemüsesorten mit hoher Konkurrenzfähigkeit einen hohen Stellenwert für die Beikrautregulierung in der Zukunft zuschreiben, wird diese Maßnahme wohl nur ein ergänzendes Glied einer Maßnahmenkombination sein. Bei Zwiebelgemüse könnte die Blattstellung die Konkurrenzkraft erhöhen. Halbaufrechte Blatthaltungen könnten verglichen mit aufrechten Blatthaltungen den Boden stärker beschatten und dadurch die Zahl keimender Beikräuter minimieren. Auch das enge Pflanzen von Sorten mit aufrechter Blatthaltung könnte den Lichteinfall auf den Boden minimieren und somit die Keimung hemmen. Bei Kohlgemüse könnten die Entwicklungsdauer und die Pflanzengröße Einfluss auf die Konkurrenzkraft haben. Bei Steckzwiebeln ist das Sortenspektrum klein und die Widerstandsfähigkeit gegen Falschen Mehltau nimmt derzeit eine wichtige Stellung ein, bei Jungpflanzen ist die Schosstoleranz von hoher Bedeutung (Koller et al., 2007). In diesen Fällen bleibt bei der Sortenwahl nicht viel Spielraum für sortenspezifische Merkmale der Beikrautunterdrückung.

Die Wahl des Saatguts kann ebenfalls Einfluss auf die Verunkrautung eines Feldes haben, je nachdem wie hoch der Besatz an Beikrautsamen ist. Aufgrund des festgesetzten maximalen Besatzes laut Saatgutrecht ist die Gefahr, Unkrautsamen mittels Saatgut einzuschleppen, bei zertifiziertem Saatgut mittlerweile allerdings sehr gering (Zwerger und Ammon, 2002).

Generell wird in ökologisch wirtschaftenden Betrieben dichter gesät als in konventionell wirtschaftenden. Zum einen, da der Kulturpflanzenbestand bei mechanischen Beikrautregulierungsmaßnahmen, allen voran der Striegelbearbeitung, reduziert wird. Des Weiteren, um möglicherweise niedrigere Keimraten abzufedern und natürlich auch, um den Platz, an dem sich Beikräuter etablieren können, zu minimieren. Bei Zwiebeln ergab ein Abstand in der Reihe von 10 cm im Vergleich zu 15 oder 20 cm eine signifikant niedrigere

Beikrautdichte und -masse (Hussain et al., 2017). Dies führte zwar zu tendenziell etwas kleineren Zwiebeldurchmessern (5,7 cm), ergab jedoch trotzdem den höchsten Ertrag, verglichen mit den anderen beiden Varianten (Hussain et al., 2017). Bei Kohl hingegen führten zu hohe Pflanzdichten zu einem negativen Einfluss auf den Ertrag (Pannacci et al., 2017). Im Gemüsebau limitieren die strengen Größenvorgaben des Handels zusätzlich den Spielraum der Saatkichte bzw. des Pflanzabstandes, da ab einer gewissen Pflanzendichte die Größe der Ernteprodukte abnimmt (Davies und Lennartsson, 2008). Beispielsweise bei Zwiebeln müssen bei der Pflanzung außerdem ausreichende Reihenabstände eingehalten werden, um mechanische Beikrautregulierung durchführen zu können (Pannacci et al., 2017). Es gilt also, einen Kompromiss aus beikrautunterdrückender und den Ertrag nicht beeinflussenden Saat- bzw. Pflanzdichte auszuwählen.

Der Vorzug von Setzlingen vor der Aussaat oder die Verwendung von vorgekeimtem Saatgut sorgen für einen Wachstumsvorsprung der Kulturpflanze gegenüber der Beikrautflora und stärkt somit deren Konkurrenzkraft (Davies und Lennartsson, 2008). Denn das Pflanzen anstelle des Aussäens führt zu einem wesentlich schnelleren Reihenschluss und verhindert damit früher das Auflaufen von Beikräutern (van der Weide, 2008). Außerdem ist die sogenannte kritische Periode, bei der die Kulturpflanze unkrautfrei gehalten werden sollte, um negative Einflüsse von Beikräutern zu verhindern, kürzer (Pannacci et al., 2017). Des Weiteren vereinfacht der Wachstumsvorsprung der Kulturpflanze die Durchführung verschiedener mechanischer Maßnahmen (van der Weide et al., 2008). Beispielsweise kann bei einer schnelleren Entwicklung der gepflanzten Kulturpflanze der Striegel früher zum Einsatz kommen und die Beikräuter in einem erfolgsversprechenden Entwicklungsstadium regulieren (Laber, 2009). Bei Steck- und Pflanzzwiebeln kommt gegenüber der Direktsaat der Vorteil hinzu, dass eine Unkrautkur (siehe Kapitel 2.3.5) aufgrund des späteren Pflanzdatums möglich ist. Das Pflanzen von Zwiebeln verringert den Aufwand für das Handjäten maßgeblich. Anstelle eines Zeitaufwandes von 100 bis 600 Stunden pro Hektar bei gesäten Zwiebeln reduziert sich das Handjäten bei gepflanzten Zwiebeln auf 10 bis 50 Stunden pro Hektar (Melander et al., 2005). Ascard und Fogelberg (2008) bestätigen diese Ergebnisse mit einer Reduktion des Zeitaufwandes für das Handjäten um 100 bis 130 h/ha bei der Pflanzung von Zwiebeln verglichen mit dem Säen. Nicht nur in Bezug auf den Abreitsaufwand für das Handjäten, auch bezüglich der Verunkrautung in der Reihe und des marktfähigen Ertrags schneiden Pflanzzwiebeln deutlich besser ab als direkt gesäte Zwiebeln (Ascard und Fogelberg, 2008). Das Vorkeimen ergab bei Zwiebeln und Lauch bei der Kombination mit physikalischen Vor-

und Nachauflaufverfahren allerdings genau wie die Wahl konkurrenzfähiger Sorten bei Lauch (wurde nur für Lauch untersucht) keinen signifikanten Einfluss auf die Wirkung der physikalischen Maßnahmen in Bezug auf die Verunkrautung in der Pflanzreihe (Melander et al., 2005). Ebenso konnte kein Effekt von vorgekeimten Saatgut oder der Sortenwahl auf die Widerstandsfähigkeit von Zwiebeln und Lauch gegenüber physikalischen Beikrautregulierungsmaßnahmen festgestellt werden (Melander et al., 2005). Nichtsdestotrotz erhöhte das Vorkeimen sowohl bei Zwiebeln als auch bei Lauch den vermarktungsfähigen Ertrag, ebenso wie die Sortenwahl bei Lauch (Melander et al., 2005).

Bei Kulturen, welche durch ihre Blattmasse konkurrenzfähiger sind, wie beispielsweise Kohlgemüse, könnten kulturtechnische Maßnahmen wie beispielsweise die Sortenwahl mehr Wirkung zeigen (Melander et al., 2005). Durch die Wahl des Saat- bzw. Pflanztermins sowie die optimierte Zufuhr von Nährstoffen könnte ein oder zwei Durchgänge physikalischer Beikrautregulierungsmaßnahmen eingespart werden (Melander et al., 2005).

2.3.5 Einfluss von Düngemaßnahmen

Die Nährstoffversorgung beeinflusst die Wachstumsgeschwindigkeit in den frühen Entwicklungsstadien und somit auch die Wettbewerbsfähigkeit der Kulturpflanzen gegenüber Unkräutern, sofern Dünger zielgenau in die Saat- beziehungsweise Pflanzreihen ausgebracht wird (Pannacci et al., 2017; Zwerger und Ammon, 2002). Ebenso wie bei Dünger ist es im Fall von Bewässerung wichtig, zielgerichtet zu bewässern, sodass die Kulturpflanze dadurch an Konkurrenzkraft gegenüber Beikräutern gewinnt (Tei und Pannacci, 2008).

Bei der Düngung mit Mist oder Gülle hat sich gezeigt, dass sowohl Mist als auch Gülle, wenn sie in etwa 10 cm Bodentiefe eingearbeitet werden, die tiefer keimende Kulturpflanze stärker fördern als die eher oberflächlich (0-3 cm Tiefe) keimende Unkräuter. Auf diese Weise verbessern sich die Wettbewerbsbedingungen zugunsten der Kulturpflanze (Davies und Lennartsson, 2008).

Betriebseigener Kompost oder Rottemist, können, wenn sie unzureichend kompostiert wurden, das Unkrautpotenzial im Boden stark erhöhen. Um das zu verhindern, müssen bei der Kompostierung mindestens eine Woche lang Temperaturen von 55 bis 66 Grad Celsius herrschen. Denn nur durch diese starke Erhitzung verlieren die Beikrautsamen ihre Keimfähigkeit. Ebenso besteht bei offener Kompostierung die Gefahr, dass Kompost oder Mist durch angeflogene Samen kontaminiert wird (Davies und Lennartsson, 2008).

Weitere Möglichkeiten zur effektiven Reinigung von Kompostmaterial, das mit Beikrautsamen kontaminiert ist, sind die Wurmkompostierung und die anaerobe Vergärung (Saha et al. 2018).

2.3.6 Unkrautkur / Falsches Saatbett

Vor allem bei konkurrenzschwachen Kulturen ist die Unkrautkur, auch falsches Saatbett genannt, eine gute Möglichkeit, den Besatz vor allem von Samenunkräutern vor der Saat/Pflanzung deutlich zu minimieren (Melander et al., 2005). Voraussetzung dafür ist, dass nach der Saatbettbereitung noch mindestens zwei, besser bis zu sechs Wochen verbleiben, bevor das Feld bestellt werden soll. Ein feinkrümeliges Saatbett, gegebenenfalls sogar gewalzt und beregnet, sorgt für das Auflaufen der Beikrautsamen. Sobald diese im Keim- bis Zweiblattstadium sind, wird der Boden zwei bis drei cm tief möglichst mit einer starren Scharhalterung und einem minimalen Anstellwinkel so bearbeitet, dass die jungen Beikräuter absterben. Eine tiefere Bearbeitung muss vermieden werden, um nicht neue Beikrautsamen aus tieferen Bodenschichten in den Oberboden zu transportieren. Dieser Vorgang kann im Abstand von etwa einer Woche zwei- bis dreimal wiederholt werden, bis schließlich gesät oder gepflanzt wird (Braun, 2011).

Ein Problem der Unkrautkur ist die Witterungsabhängigkeit. Das gewünschte, verfrühte Auflaufen der Beikräuter tritt nur bei ausreichender Wasserversorgung ein. Eine dazu je nach Wetterverhältnissen notwendige künstliche Bewässerung erhöht den Arbeitsaufwand der Unkrautkur drastisch und wird daher nur selten durchgeführt. Eine weitere Schwachstelle der Unkrautkur ist die enge Bandbreite der für den Einsatz geeigneten Geräte, da nicht sehr tief (maximal 10 bis 20 mm) gearbeitet werden darf. Stehen keine passenden Bodenbearbeitungsgeräte zur Verfügung, kann die Unkrautkur nur noch mit dem ressourcenintensiven Abflammgerät durchgeführt werden, was wiederum einen Mehraufwand bedeutet (Pannacci et al., 2017; Braun, 2011).

Sowohl für den Anbau von Kohl als auch für den Anbau von Zwiebeln hat sich die Unkrautkur als eine effektive Beikrautregulierungsmaßnahme erwiesen (Pannacci et al., 2017). Allerdings ist sie bei früher oder sehr später Kultur schlecht realisierbar (Tei et al., 2005). Bei Zwiebeln bleibt die Unkrautkur jedoch zumeist auf Anbausysteme mit gesteckten oder gepflanzten Zwiebeln beschränkt, da die Witterungsverhältnisse vor der früheren Direktsaat häufig nicht für die Durchführung der Unkrautkur geeignet sind (Koller et al., 2007). Sowohl eine dreimalige als auch eine fünfmalige 7,5 cm tiefe Bodenbearbeitung vor der Pflanzung von

Lauch ergab vier Wochen nach der Pflanzung signifikante Unterschiede bezüglich der Biomasse an Beikräutern verglichen mit der Kontrolle, die lediglich einmal vor der Pflanzung bearbeitet wurde (Douds Jr. et al., 2018).

Die Effektivität der Unkrautkur hängt entscheidend vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens und den Witterungsbedingungen ab (Melander et al., 2005). Die Durchführung einer Unkrautkur kann sowohl zur beträchtlichen Reduktion der Beikräuteranzahl in der nachfolgenden Kultur führen, die Problematik einiger Beikrautarten verschlimmern als auch durch verspätete Saat zu Ertragseinbußen führen (Melander et al., 2005). Letzteres kann in Anbetracht einer erfolgreichen Unkrautkur und somit reduziertem Aufwand des Handjärens finanziell vertretbar sein (Melander et al., 2005). Ein Risiko bei der Durchführung des falschen Saatbetts ist der mögliche erhöhte Wasserverlust des Bodens (Heuberger, 2015). Die Effizienz der Unkrautkur hängt entscheidend von dem dafür aufgebrauchten Mehraufwand (Walzen, Bewässerung, etc.) und der Gerätewahl ab.

2.4 Physikalische Maßnahmen der Beikrautregulierung

Nach den eher indirekten kulturtechnischen Maßnahmen wird es in diesem Kapitel um die physikalischen Maßnahmen zur direkten Beikrautregulierung gehen. Dazu gehören neben der mechanischen auch die elektrische und die thermische Beikrautregulierung sowie das Mulchen.

2.4.1 Mechanische Beikrautregulierung

Dieses Kapitel ist aufgrund der Bedeutung der mechanischen Maßnahmen im Rahmen der nicht-chemischen Beikrautregulierung recht ausführlich und wird deshalb nochmals untergliedert. Im ersten Teil werden nach einer überblicksartigen Analyse, die alle mechanischen Maßnahmen betrifft, einige im Zwiebel- und Kohlanbau häufig eingesetzten mechanischen Geräte zur Regulierung der Beikräuter zwischen und in der Reihe näher betrachtet. Im zweiten Teil wird näher auf den Beitrag von Präzisionstechnik, also automatisierten Lenksystemen, Robotik und Ähnliches eingegangen.

2.4.1.1 Mechanische Geräte zur Beikrautregulierung

Mechanische Beikrautregulierungsmaßnahmen sind die wichtigsten direkten Methoden im biologischen Anbau. Auch in konventionellen und integrierten Anbausystemen werden mechanische Maßnahmen eingesetzt, um die Abhängigkeit von Herbiziden zu vermindern, der Entstehung von Herbizidresistenzen vorzubeugen und eine vielfältige, wenig spezialisierte und leicht regulierbare Beikrautflora zu erhalten (Pannacci et al., 2017).

Mechanische Verfahren zur Beikrautregulierung basieren auf dem Entzug lebenswichtiger Wachstumsfaktoren wie Wasser, Sauerstoff oder Licht im Zuge des Verschützens, Vergrabens, Entwurzeln oder der Beschädigung durch Abschneiden oder Abreißen (Krug et al., 2002). Abhängig von den Beikrautspezies ist die Effektivität der verschiedenen Verfahren unterschiedlich gut. Während beispielsweise das Herausziehen von Persischem Ehrenpreis und Ackervergissmeinnicht nicht wirkungsvoll ist, zeigt das Verschütten bei Vogelsternmiere und Nachtschatten keine Wirkung (Verschwele, 2017). Die Effizienz von Maßnahmen, die auf Verschütten oder Vergraben beruhen, ist von der Schüttfähigkeit des Bodens, der Unkrautgröße und der Arbeitstiefe und dem damit einhergehenden Lichtentzug abhängig (Krug et al., 2002). Der Bekämpfungserfolg entwurzelter Verfahren beruht auf der Bodenfeuchtigkeit und der Luftfeuchtigkeit, welche darüber entscheiden, ob es zur Vertrocknung oder zum erneuten Anwachsen der Beikräuter kommt (Krug et al., 2002). Bei Beikräutern mit vorwiegend vegetativer Vermehrung ist die Beschädigung wenig zielführend bis kontraproduktiv.

Mechanische Maßnahmen dienen in vielen Fällen nicht nur der Beikrautregulierung, sondern auch der Verbesserung der Wachstumsbedingungen der Kulturpflanzen. Durch die Bodenbearbeitung wird die Mineralisierung im Boden angeregt und Stickstoff für die Kulturpflanzen verfügbar. Außerdem wird der Boden bei richtiger Durchführung der Bodenbearbeitung gelockert und durchmischt und somit besser durchlüftet. Allerdings regt Bodenbearbeitung auch die Keimung von Beikräutern an und die verbesserten Bodenbedingungen kommen jenen gleichermaßen zugute wie der Kulturpflanze (Zwinger und Ammon, 2002). Mechanische Maßnahmen zur Beikrautregulierung können allerdings auch zur Bodenverdichtung beitragen und auf diese Weise das Wurzelwachstum beeinträchtigen (Ball, 2006).

Während effektive mechanische Beikrautregulierung zwischen den Kulturreihen heutzutage keine große Herausforderung mehr darstellt (Melander et al., 2005), ist die Regulierung in der Reihe noch immer nicht weit genug fortgeschritten, dass das Handjäten der Vergangenheit

angehören könnte. Mit konventionellen mechanischen Beikrautregulierungsmethoden werden, je nach Literaturquelle, 70-80 Prozent eines Feldes von Beikraut befreit (Griepentrog et al., 2006; Laber, 1999). Doch gerade die überbleibenden Beikräuter befinden sich oft nahe an der Kulturpflanze und können, sofern sie konkurrenzfähiger als die Kulturpflanze sind, besonders großen Einfluss auf Entwicklung und Ertrag der Nutzpflanze ausüben (Griepentrog et al., 2006) und sind somit auch von finanzieller Bedeutung. Mit jedem weiteren Zentimeter, der nahe der Kulturpflanze von Unkraut befreit wird, können pro Hektar bis zu 10 Handarbeitsstunden eingespart werden (Ökolandbau, 2014). Im Zwiebelanbau können Beikräuter in der Reihe durch klassische, nicht computergesteuerte, mechanische Maßnahmen um 36 bis 71 Prozent dezimiert werden, allerdings mit Pflanzenverlusten von 7 bis 20 Prozent (Ascard und Fogelberg, 2008). Neue, selektive Geräte bieten großes Potenzial, gerade diese Beikrautregulierung in der Reihe zu optimieren.

Schadensschwellen auf Basis der Bekämpfungswürdigkeit von Beikräutern sind im Gemüsebau nicht üblich. Sie berücksichtigen das erhöhte Samenpotenzial im Boden als langfristige Folgen tolerierter Verunkrautung nicht, welches gerade bei Kulturen mit anspruchsvoller Beikrautregulierung wie Zwiebelgemüse von großer Bedeutung ist (Krug et al., 2002). Stattdessen gibt es im Gemüsebau je nach Konkurrenzkraft einer Kultur sogenannte "Zeitbezogene Schadensschwellen" und "Kritische Perioden" (Krug et al., 2002). Dem Konzept der "Zeitbezogenen Schadensschwelle" zufolge müssen Gemüsekulturen spätestens zwei bis vier Wochen nach dem Auflaufen oder der Pflanzung unkrautfrei sein oder nur Unkräuter unter 5 cm Höhe aufweisen, damit konkurrenzbedingte Ertragsverluste vermieden werden können (Laber, 2009). Zuvor führen Beikräuter in noch jungen Entwicklungsstadien aufgrund des ausreichend bemessenen Standraums und der noch kleinen Kulturpflanzen weder zu konkurrenzbedingtem noch zu erntetechnisch relevantem Schaden (Krug et al., 2002). Während der "Kritischen Periode", welche auf die Periode der akzeptablen Anfangsverunkrautung folgt, können Ertragseinbußen nur durch Unkrautfreiheit vermieden werden (Krug et al., 2002). Bei Zwiebelgemüse hat die kritische Phase allerdings durch die geringe Konkurrenzkraft bei weitem mehr Bedeutung als bei Kohl. Heilmann und Zimmer (1990) betonen auch die Bedeutung der frühzeitigen Eliminierung bereits kleiner Beikräuter zu Beginn der Kulturperiode bei Lauch. Bei Kohlgemüse hingegen führte eine einmalige mechanische Beikrautregulierung 3 bis 5 Wochen nach dem Pflanzen zum selben Ertrag wie eine vollkommen unkrautfreie Kontrolle (Tei et al., 2005). Das Problem mit dem optimalen Einsatzzeitpunkt der verschiedenen Maßnahmen ist allerdings, dass dieser sowohl vom Entwicklungsstadium der Beikräuter als auch vom Entwicklungsstadium der Kulturpflanze

abhängt. Um den Einsatz jeglicher mechanischer Regulierungsmaßnahmen ohne Schaden zu überstehen, müssen gesäte Zwiebeln mindestens 10 cm groß sein (Melandar et al., 2005). Bei gesäten Zwiebeln wirkt sich eine tiefe Saat (2-3 cm) positiv auf die Verwurzelung aus und verbessert dadurch den Striegeleinsatz (Koller et al., 2007). Bei gepflanzten Zwiebeln ist deren Widerstandsfähigkeit für die meisten mechanischen Beikrautregulierungsmaßnahmen entscheidend (Ascard und Fogelberg, 2008). Wenn die Kulturpflanze zu Beginn der kritischen Phase noch nicht ausreichend robust und fest verwurzelt ist, können verschiedene Maßnahmen nicht durchgeführt werden und die Beikräuter überschreiten möglicherweise das Entwicklungsstadium, in welchem sie am sensibelsten und leicht zu entfernen sind. Diese Problematik, welche häufig nur mit Handjäten gelöst werden kann, kann durch einen ausreichenden Wachstumsvorsprung der Kulturpflanzen verhindert werden.

Probleme ergeben sich bei der mechanischen Beikrautregulierung beispielsweise mit dem Striegel oder der Fingerhacke, wenn der Boden verkrustet ist oder längere feuchte Bodenbedingungen eine Bearbeitung im für die Bekämpfung passenden Entwicklungsstadium der Beikräuter verhindern (Marold, 2000). Neben den unbeeinflussbaren Klimabedingungen ist ein sehr gutes Zeitmanagement Voraussetzung dafür, die Maßnahmen zum richtigen Zeitpunkt durchführen zu können (Plagge, 2000), da der Bearbeitungszeitpunkt ein entscheidender Einflussfaktor für die Effektivität ist (van der Weide et al., 2008). Je vielfältiger die angebauten Kulturen beziehungsweise je diverser die gewählten Reihenabstände sind, desto mehr Zeit wird zum Umrüsten von Bodenbearbeitungsgeräten benötigt (Plagge, 2000). Da die Wirkung der mechanischen Beikrautregulierung allerdings von der passenden Geräteeinstellung beeinflusst wird, sind Anpassungen der Geräte an Kultur und Reihenabstände unausweichlich (van der Weide et al., 2008). Unpassende Einstellungen oder Bearbeitungszeitpunkte können zu mangelndem Bekämpfungserfolg oder Schädigungen der Kulturpflanze führen (van der Weide et al., 2008).

Diese Arbeit hat zum Ziel, sowohl die Effizienz als auch die Qualität von Beikrautregulierungsmaßnahmen zu evaluieren. Bei den meisten mechanischen Verfahren kommt dies einem Widerspruch gleich, da sie meist einen Kompromiss aus effizienter Regulierung der Beikräuter und kleinstmöglichem Schaden an der Kulturpflanze bedeuten (Griepentrog und Dedousis, 2010). Je höher die Effizienz gegen Beikräuter (Verringerung der unbearbeiteten Fläche), desto höher sind meistens auch die Schäden an der Kulturpflanze. Das hängt auch mit der Fahrgeschwindigkeit zusammen. Einige Geräte erfordern Geschwindigkeiten von 5 bis 10 km/h und sind mit zunehmender Geschwindigkeit zwar

effektiver, führen jedoch auch häufiger zu Beschädigungen der Kulturpflanze (Gaus et al., 2017). Die Wahrscheinlichkeit für Schäden ist umso höher, je jünger, schlechter verwurzelt und weniger elastisch die Kulturpflanze ist. Negative Einflüsse durch beeinträchtigt Wurzelwachstum infolge von Bodenverdichtung wären bei der Bewertung der Qualität von mechanischen Verfahren ebenfalls zu berücksichtigen, allerdings liegen zu diesem Thema keine ausreichenden wissenschaftlichen Quellen vor.

Die Arbeitsleistung mechanischer Verfahren im Gemüsebau ist verglichen mit den gleichen Maßnahmen im Ackerbau häufig geringer (Zwenger und Ammon, 2002). Dies ist bedingt durch die geringere Arbeitsbreite, welche wiederum auf die Anbautechnik zurückzuführen ist (Zwenger und Ammon, 2002). Anwendungsvoraussetzung für effiziente mechanische Maßnahmen ist eine gute Saat- bzw. Pflanzbettbereitung, die ebenen, gut bearbeitbaren Boden hinterlässt (Melander et al., 2005). Ebenso muss ein Wachstumsvorsprung der Kulturpflanze gegenüber den Beikräutern gegeben sein (Zwenger und Ammon, 2002). Beispielsweise die Unkrautkur oder das Vorauflaufabflammen dienen dazu, diesen Wachstumsvorsprung zu gewährleisten. Als Schwächen der mechanischen Beikrautregulierung sind die teils mangelhafte Wirkung verschiedener Geräte in der Reihe und der je nach Geräteeinsatz mehr oder weniger hohe Zeit- und Kostenaufwand zu verzeichnen. Letzterer entsteht beispielsweise durch die hohen Anschaffungskosten spezialisierter Geräte und deren Wartung. Der Wirkungserfolg mechanischer Maßnahmen hängt von geeignetem Bedienpersonal ab, um die richtige Geräteanpassung beispielsweise an Bodenverhältnisse und Reihenabstände anzupassen sowie die sorgfältige Durchführung ohne Schäden an der Kulturpflanze zu gewährleisten. Des Weiteren hängt der Bekämpfungserfolg von der Beikrautart, dem Entwicklungsstadium und dem Widerstand des Beikrauts gegen Entwurzelung ab (Pannacci et al., 2017). Diese hohe Abhängigkeit der Effektivität mechanischer Maßnahmen von externen Faktoren genauso wie der große Einfluss von Klima- und Bodenverhältnissen wirken sich negativ auf die Zuverlässigkeit mechanischer Maßnahmen aus. Bezüglich der Regulierung vegetativer Beikrautspezies stehen verschiedene mechanische Maßnahmen zusätzlich in der Kritik, Rhizome zu zerteilen und verbreiten und somit kontraproduktiv zu sein (Zwenger und Ammon, 2002). Folgende Tabelle 2 fasst die wichtigsten Charakteristika der im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau häufig eingesetzten mechanischen Geräte zusammen.

Tabelle 2: Übersicht über die wichtigsten Geräte (Quelle: Pannacci et al., 2017; Braun, 2011; Krug et al., 2002)

| Gerät | Besondere Eignung für: | Bekämpfungserfolg | Vorteile | Nachteile |
|-------|------------------------|-------------------|----------|-----------|
|-------|------------------------|-------------------|----------|-----------|

| | | | | |
|---------------|--|--|--|--|
| Netzegge | Beikräuter in jungen Entwicklungsstadien | | Hohes Anpassungsvermögen an Boden | |
| Striegel | Keimende Beikräuter bis Zweiblatt-Stadium | 50-100% bei mehrmaligen Einsatz nach Auflaufen der Kultur | Vielseitig einsetzbar; je nach Druck und Zinkenfederung anpassungsfähig an verschiedene Bodenverhältnisse (leichten, schweren Boden) | Wiederholter Einsatz notwendig (Van der Weide et al., 2008); Nur Beikräuter im Keimblattstadium werden effektiv bekämpft (Van der Weide et al., 2008) |
| Scharhacke | Schwere Böden; weiter entwickelte Beikräuter (Zweiblattstadium bis etwa 5 cm groß) | 60-100% zwischen den Reihen, 20-40% bzw. bis zu 70% im Reihbereich | Mit schräg gestellten Scharen bzw. mit Häufelkörper Bekämpfung kleinerer Beikräuter in den Kulturreihen durch Anhäufeln möglich | Bearbeitet hauptsächlich den Zwischenreihenraum; |
| Sternhacke | | Verglichen mit der Scharhacke geringerer Wirkungsgrad zwischen, aber höherer in den Reihen | Weniger abhängig von der Bodenfeuchte als andere Geräte (Fibl, 2012) | Wenig effektiv gegen ausdauernde Wurzelbeikräuter |
| Hackbürste | Schwere Böden; Keimblatt- bis Vierblattstadium | | Näheres Arbeiten an Kulturpflanze möglich als mit Scharhacke; flache Bearbeitung | Geringe Arbeitsgeschwindigkeit, hohe Verschleiß der Bürsten, hohe Abhängigkeit von Bodenfeuchtigkeit, wenig effektiv gegen weiter entwickelte Beikräuter |
| Torsionshacke | Optimal für Beikräuter bis zum 2-Blatt-Stadium | Wirkungsvolle Ergänzung der Scharhacke für die Regulierung in der Reihe | Kostengünstige Anschaffung; Gute Wirkung im Reihbereich | Gepflanzte Kulturen empfindlicher als gesäte; Erdpresstöfpe weniger gut geeignet als Speedy |
| Fingerhacke | Keim- bis 4-Blattstadium | 50% Effektivität und Reduktion des Unkrautdichte um 25% bei gesäten Zwiebeln | Ebenso wie Torsionshacke relativ effektiv im Reihbereich | Genauso wie bei Torsionshacke sehr präzise Steuerung → niedrige Effizienz; Hohe Abnutzung der Finger; |

Striegel und Egge

Ursprünglich wurde der Striegel eher im Getreideanbau eingesetzt, aber mittlerweile auch vermehrt im Gemüseanbau, beispielsweise bei Zwiebeln (Pannacci et al., 2017). Heute ist der Striegeleinsatz sowohl im biologischen Zwiebel- als auch im Krautanbau eine gängige Praxis (siehe Experteninterviews im Anhang). Die Wirkung von den ganzflächig arbeitenden Geräten

Striegel basiert zum größten Teil auf dem Verschütten und in geringerem Ausmaß auch auf dem Entwurzeln von Beikräutern (Krug et al., 2002).

Netzegge und Striegel unterscheiden sich dadurch, dass der Druck beim Striegel im Gegensatz zur Egge nicht durch das Eigengewicht bestimmt, sondern veränderbar ist und mit dem Winkel der Zinken variiert (Krug et al., 2002). Ebenso kann die Wahl der Zinken variiert werden (Krug et al., 2002). Je weniger Druck angewendet wird und je weniger starr, also je gefederter die Zinken sind, desto schonender ist der Striegeleinsatz für die Kulturpflanze (Krug et al., 2002). Im Falle von Zwiebel- und Kohlgemüse wird der Striegel mit Ausnahme der Steckzwiebeln nicht zum sogenannten "Blindstriegeln" eingesetzt, sondern ab dem 2- bis 4-Blattstadium der Kultur. Wenn die Gemüsepflanzen gut angewachsen sind, können bei einer Striegelbearbeitung zu diesem Zeitpunkt Verluste und Beschädigungen auf ein Minimum reduziert werden (Lichtenhahn et al., 2005; Krug et al., 2002). Bei Zwiebeln hat sich eine Pflanzenhöhe von 8-10 cm als ideal für das Striegeln herausgestellt, größeres Laub verträgt die Striegelbearbeitung schlechter (Koller et al., 2007). Auch kleine, gut verwurzelte Lauchpflanzen können bis etwa sechs Wochen nach der Pflanzung gestriegelt werden (Krug et al., 2002). Am effektivsten wirkt der Striegel gegen zweikeimblättrige Beikräuter im Keimblatt- bis zum Zweiblattstadium (Pannacci et al., 2017). Mit zunehmender Entwicklung der Beikräuter nimmt die Wirkung von Egge und Striegel stark ab (Melander, 2014). Gräser werden weniger gut reguliert und ausdauernde Beikräuter werden nicht erfasst (Pannacci et al., 2017). Der zwei- bis dreimalige Einsatz des Striegels in aufgelaufenen Kulturen kann die Verunkrautung um 50 bis 100 Prozent reduzieren (Krug et al., 2002). Ein Versuch mit einer Striegelbearbeitung bei 1 bis 2 cm großen Zwiebeln und einer hohen Dichte an Beikräutern im Zwei-Blatt-Stadium, darunter vor allem Portulak (*P. oleracea*) und Amaranth (*A. retroflexus*), führte zu einer Beikrautdezimierung um 25 Prozent und einer um 50 Prozent reduzierten Bestandesdichte (Pannacci et al., 2007). In gepflanzten Zwiebeln kann das Striegeln, was mehrmals durchgeführt wird, sobald die Pflanzen gut verwurzelt sind, jedoch auch einen Pflanzenverlust von bis zu 20 Prozent verursachen (Ascard und Fogelberg, 2008). Das kann leichte Ertragsverluste nach sich ziehen, doch es gibt auch einen Versuch, bei welchem infolge eines 20-prozentiger Pflanzenverlusts keine Ertragseinbußen verzeichnet wurden (Ascard und Fogelberg, 2008). Das könnte jedoch auch damit zusammenhängen, dass die Kontrolle eventuell starkem Unkrautdruck ausgesetzt war und dadurch ebenfalls einen eher geringen Ertrag erzielte. In Anbausystemen mit Steckzwiebeln kann das sogenannte "Blindstriegeln" durchgeführt werden, vorausgesetzt die Zwiebeln werden mindestens 5 cm tief gesteckt (van der Weide et al., 2008; Koller et al., 2007).

Diese Maßnahme wird vor allem dann empfohlen, wenn eine Unkrautkur beispielsweise aufgrund unpassender Witterungsbedingungen nicht möglich war und die Beikräuter im Keim- bis 2-Blattstadium, dem optimalen Entwicklungsstadium für das Blindstriegeln, sind (Koller et al., 2007). Als Beikrautregulierungsmaßnahme vor dem Auflaufen von Zwiebeln hat sich das Blindstriegeln als vergleichbar wirkungsvoll wie das Abflammen erwiesen und weist darüber hinaus noch kosten- und umwelttechnische Vorteile auf (Melander et al., 2005). Allerdings ist das Striegeln im Voraufverfahren oder kurz nach dem Auflaufen von Zwiebeln auch mit einem größeren Risiko möglicher Ertragseinbußen verbunden (Ascard und Fogelberg, 2008).

Beim Striegel tritt der Kompromiss aus effizienter Regulierung und minimalen Kulturverlusten bzw.- beschädigungen besonders stark auf, da die Kulturpflanze der gleichen Maßnahme ausgesetzt ist wie die Beikräuter. Ein Wachstumsvorsprung der Kulturpflanze ist deshalb eine unumgängliche Voraussetzung des Striegeleinsatzes. Nichtsdestotrotz sind die Kulturpflanzen der Striegelbearbeitung ausgesetzt und effektivere Geräteeinstellungen treffen die Gemüsepflanzen im gleichen Maß wie die Beikräuter. Aus diesem Grund ist die Effektivität des Striegels generell häufig unbefriedigend (Griepentrog und Dedousis, 2010). Trotzdem gibt es je nach Kultur, Beikrautflora, Geräteeinstellung, Boden- und Klimabedingungen sowie Einsatzzeitpunkt große Unterschiede. Je nach vorherrschender Beikrautart können unterschiedliche Zinkeneinstellungen mehr oder weniger zielführend sein (Pannacci et al., 2017). Griepentrog und Dedousis (2010) bestätigen, dass die Maschinenwahl, die Einstellung und der Einsatzzeitpunkt entscheidende Faktoren für die Effektivität der Striegelbearbeitung sind. Ein Beispiel für veränderte Effektivität durch Geräteeinstellungen oder technische Anpassung ist der im Gemüsebau häufiger eingesetzte Beetstriegel, der vor allem bei der Verwendung im Zwischenachsenbau feiner justiert werden kann und dadurch Pflanzenbeschädigungen minimiert (Koller und Total, 2011). Ein weiteres Beispiel ist das Ersetzen von Erdpresstöpfen durch die tiefe Pflanzung mit Speedy, welches einen früheren Einsatz des Striegels zu einem Zeitpunkt ermöglicht, an dem Beikräuter effektiver erfasst werden können (Koller und Total, 2011). Lässt man die generell eher unbefriedigende Effektivität der ganzflächigen Bearbeitung Beiseite, wird dem Striegeln aufgrund der raschen flächigen Bearbeitung, der relativ hohen Fahrgeschwindigkeit und der großen Arbeitsbreite eine hohe Effizienz zugeschrieben (Ascard und Fogelberg, 2008). Im Vergleich zu Finger- und Torsionshacke sind die Anforderung an eine exakte Steuerung nicht so hoch, was den Einsatz erleichtert (Ascard und Fogelberg, 2008). Der Ausfall an beschädigten Kulturpflanzen, mit dem

eine effektive Regulierung von Beikräutern meist verbunden ist, kann durch eine Erhöhung der Pflanzzahl um 2-5% ausgeglichen werden (Koller und Total, 2011).

Auch der Rollstriegel hat Potenzial sowohl im Zwiebel- als auch im Kohlgemüseanbau (siehe auch Experteninterview). Versuchsergebnisse mit Rüben zeigen beispielsweise, dass der mehrmalige Einsatz von Hacke kombiniert mit dem Rollstriegel sehr effizient gegen Beikräuter ist und den Aufwand für die Handhacke deutlich minimiert (Haberland und Koch, 2007).

Hacke

Die Wirkungsweise von Scharhacken beruht auf dem Prinzip des Abschneidens und Entwurzeln von Beikräutern. Hacken arbeiten nicht wie Egge und Striegel ganzflächig, sondern nur zwischen den Reihen (Krug et al., 2002). Der Einsatz von Hackgeräten ist bei Reihenbreiten von 0,3 bis 0,75 m wie beispielsweise bei Kohl üblich (Pannacci et al., 2017), ist aber auch schon bei Reihenbreiten von 0,25 m möglich (Bolten und Wilhelm, 2011). Die Hacke stellt bei den befragten Landwirten (sowohl Kraut- als auch Zwiebelproduktion) eine wichtige Rolle im Rahmen der Beikrautregulierung dar (siehe Experteninterview im Anhang). Teilweise wird die Hacke mit dem Striegel kombiniert. Die Effektivität wird als sehr hoch beschrieben und die Qualität ebenfalls. Pflanzenbeschädigungen entstehen hauptsächlich bei falschen Einstellungen.

Die Beikrautregulierung mittels Hackgerät erfolgt mit relativ hoher Arbeitsgeschwindigkeit und ist deshalb wenig zeitaufwendig (Pannacci et al., 2017). Hacken ist auch in weit entwickelten Kulturständen (bis zum Reihenschluss) möglich und wirkt sowohl gegen junge (Zwei- bis Vierblattstadium) als auch gegen weiter entwickelte Beikräuter (Pannacci et al., 2017). Die Präzisionshacke wurde entwickelt, um auch bei geringeren Reihenabständen (0,2 – 0,25 m) hacken zu können (Pannacci et al., 2017). Dieses Gerät macht es unter anderem möglich, auch bei der Produktion von Zwiebeln hacken zu können (Pannacci et al., 2017). Voraussetzung für das präzise Hacken in engen Reihen ist ein feinkrümeliges, ebenes Saatbett, welches wiederum stärker erosionsanfällig ist (Bolten und Wilhelm, 2011). Bei präzisen Reihenabständen ist beim Arbeiten mit Reihensteuerungssystemen oder mit einer regenfesten Markierungslinie auch das Blindhacken im Voraufbau möglich (Bolten und Wilhelm, 2011).

Der Bekämpfungserfolg ist abhängig von den Arbeitsgeräten, der Arbeitstiefe, den Bodenbedingungen (Bodenfeuchte, Textur) und den Witterungsbedingungen (Pannacci et al., 2017). Regen minimiert die Effektivität um 30 bis 40 Prozent (Lichtenhahn et al., 2005). Mithilfe von elektronischen Steuerungssystemen ist das Hacken bei einer Geschwindigkeit von

10 km/h mit nur 15 cm Abweichung von der Reihe möglich (Melander et al., 2005) und stellt damit eine sehr effiziente Maßnahme dar. Durch das Hacken können die Reihen an- oder abgehäufelt werden und auf diese Weise teils auch Beikräuter in der Reihe erfasst werden (Laber, 2009). Im Lauchanbau dient das ein- bis zweimalige Anhäufeln im August bzw. September neben der Beikrautregulierung auch zur Erzeugung langer Schäfte und zum Schutz gegen Frost (Krug et al., 2002). Durch diesen Mehreffekt wird die Effizienz des Hackens im Lauchanbau noch gesteigert. Nichtsdestotrotz ist die Wirksamkeit der Hackgeräte auf die Beikräuter in der Reihe begrenzt und stellt somit deren größte Schwäche dar (Pannacci et al., 2017).

Hackbürste

Die Hackbürste kann bereits frühzeitig eingesetzt werden, da die Kulturpflanzen durch einen Tunnel geschützt werden (Fibl, 2012). Sobald die Kultur allerdings zu viel Blattmasse entwickelt hat, ist die Hackbürste nicht mehr einsetzbar (Koller, 2011). Je nach Rotationsrichtung wirkt die Hackbürste entwurzelnd oder anhäufend auf die Beikräuter in der Reihe (Van der Weide et al., 2008). Während horizontale Hackbürsten vorwiegend auf die Beikräuter zwischen den Reihen einwirken, bearbeiten vertikale Hackbürsten den Bereich in der Reihe (Pannacci et al., 2017). Am besten werden Beikräuter im Keimblatt- bis Vierblattstadium erfasst, je weiter die Beikräuter entwickelt sind, desto stärker wird die Effektivität vermindert (Pannacci et al., 2017). Die relativ flache Bearbeitung von 1-3 cm (Pannacci et al., 2017) verhindert den Transport von Beikrautsamen aus tiefen Bodenschichten in oberflächennahe Bodenschichten und somit deren Keimung. Das stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber tiefergreifenden Geräten dar.

Die Kombination aus Hacke und Hackbürste kann bei ungünstigen Witterungsbedingungen oder weiter entwickelten Beikräutern den Bekämpfungserfolg erhöhen, da die Beikräuter durch das Hacken zuerst gelockert und entwurzelt und durch die Bürste anschließend weiter entwurzelt und auf der Bodenoberfläche abgelegt werden (Melander et al., 2005). Ebenso ist eine Kombination mit der Torsionshacke möglich, um die Reihen anzuhäufeln und damit Beikräuter in der Reihe im Keimblattstadium zu bedecken (Fibl, 2012).

Einzelne Geräte können nicht immer für sich alleine bewertet werden, denn in manchen Fällen entfalten sie ihre Effektivität erst in einer kombinierten Anwendung mit einer anderen Maßnahme. So führte beispielsweise ein Versuch, bei welchem vor dem Auflaufen abgeflammt wurde und nach dem Auflaufen die Hackbürste eingesetzt wurde, zu einer Dezimierung des

Beikrauts im Lauchanbau um 90 Prozent und im Zwiebelanbau um 39 bis 85 Prozent (Melander et al., 2005).

Die Hackbürste kann nicht an Unebenheiten angepasst werden und ist daher nur in ebenen Beeten einsetzbar (Koller, 2011). Weitere Einschränkungen sind der hohe Verschleiß der Bürsten sowie eine starke Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit. Die Effizienz ist trotz gegebener Effektivität (bei Beikräutern in frühen Entwicklungsstadien) durch eine niedrige Arbeitsgeschwindigkeit (0,3-0,5 ha/h) gering (Pannacci et al., 2017).

Finger- und Torsionshacke

Fingerhacken regulieren sowohl Beikräuter zwischen als auch in der Reihe. Den Fingern vorgelagerte Schare lockern den Boden in der Reihe und unterschneiden die Beikräuter. Fingerhackgeräte werden hauptsächlich bei Reihenabständen von 0,25 bis 0,5 m eingesetzt und sind somit sowohl für den Anbau von Kohlgemüse als auch für die Produktion von Zwiebeln und Lauch zur Beikrautregulierung geeignet (Pannacci et al., 2017).

Um so weit wie möglich in der Reihe zu arbeiten, ohne jedoch die Kulturpflanze zu beschädigen, ist eine sehr akkurate Einstellung notwendig. Ab dem Vier-Blatt-Stadium können gut bewurzelte Kulturpflanzenbestände mit der Fingerhacke bearbeitet werden. Um die akkurate Bearbeitung an den Kulturpflanzenreihen ohne Pflanzenschäden zu gewährleisten, können nur sechs Reihen gleichzeitig bearbeitet werden (Pannacci et al., 2017). Als Schwäche der Fingerhacke hat sich ein niedriger Wirkungsgrad gegen Beikräuter im Zwei- bis Vierblattstadium in Tonböden herausgestellt (Pannacci et al., 2017). Außerdem können verschiedene Bodenbedingungen den Einsatz erschweren oder Probleme bereiten. Steiniger Boden kann beispielsweise die Finger abbrechen, bei trockenem, krustigen Boden ist das Aufbrechen durch die Finger problematisch (Fibl, 2012).

Die Torsionshacke kann mit einer Schar- oder Präzisionshacke kombiniert werden und eignet sich für die Beikrautregulierung in gut angewachsenen Kulturen (Fibl, 2012). Sie hat sich im Zwiebelanbau als sehr effektiv erwiesen, der Ertrag derartig bearbeiteter Schläge gleicht jenen, die chemisch von Beikraut befreit wurden (Pannacci et al., 2017). Auch im Lauchanbau hat sich die Torsionshacke mit einem Bekämpfungserfolg von 80% bewährt (Pannacci et al., 2017). Am effektivsten arbeitet die Torsionshacke gegen Beikräuter im Keimstadium bis zum Zwei-Blatt-Stadium (Pannacci et al., 2017). Um Beikräuter regelmäßig in diesem Entwicklungsstadium zu erfassen, ist allerdings ein häufiger Einsatz notwendig. Ascard und Fogelberg (2008) haben in ihren Zwiebelversuchen bei einem zweiwöchigen Einsatz nicht den

erwünschten Effekt erzielt, da einige Beikräuter bereits zu groß waren und empfehlen eine wöchentliche Durchführung. Das würde dann wohl eine verbesserte Effektivität versprechen, die Effizienz aufgrund des erhöhten Zeit- und Ressourcenaufwands aber minimieren. Ein Vergleich zwischen dem Einsatz von Torsionshacke, Standardbearbeitung mit Gänsefußschar sowie einer Striegelbearbeitung ergab die besten Ergebnisse in Bezug auf die Beikrautreduktion und die Reduktion des Handjätens bei der Torsionshacke (Fogelberg, 2007). Dies ist der nicht zu unterschätzenden Effektivität der Torsionshacke in der Reihe zuzuschreiben. In gepflanzten Zwiebeln hat ein Durchgang mit der Hacke gefolgt von drei Durchläufen mit Torsionshacke verglichen mit einer ausschließlichen Zwischenreihenbearbeitung (vier Hackdurchläufe) bei gleichbleibendem Ertrag zu einer Reduktion der Beikräuter in der Reihe um 85 Prozent und des manuellen Arbeitsaufwandes um 73 Prozent geführt (Ascard und Fogelberg, 2008). Auch bei gesäten Zwiebeln, welche vor dem Auflaufen abgeflammt wurden, hat der wiederholte Einsatz der Torsionshacke verglichen mit dem Gänsefußschareinsatz etwa 50 Prozent mehr Beikräuter eliminiert und den manuellen Jätaufwand um etwa 40 Prozent reduziert (Ascard und Fogelberg, 2008). In gesäten Zwiebeln ist der Zeitraum für den Einsatztermin für mechanische Bearbeitung in der Reihe beispielsweise mit der Torsionshacke sehr kurz. Um den Zeitaufwand für das Handjäten nennenswert zu verringern, müsste die Torsionshacke ein bis zwei Wochen nach dem Auflaufen der Zwiebeln, wenn die Beikräuter noch klein und gut regulierbar sind, eingesetzt werden (Ascard und Fogelberg, 2008). Zu diesem Zeitpunkt ist die Zwiebel allerdings noch im empfindlichen Stadium vor dem Erreichen des Zweiblattstadiums, ab welchem größere Pflanzenschäden vermieden werden können (Ascard und Fogelberg, 2008). Dieses enge Zeitfenster, in welchem auch die Witterungsbedingungen eine bedeutende Rolle spielen, verdeutlicht, warum das Säen von Zwiebeln in Anbausystemen, die selbst im Notfall nicht auf Herbizide zurückgreifen können, in Bezug auf die Beikrautregulierung riskant ist. Ebenso verdeutlicht dies die Bedeutung von Maßnahmen, die das Beikrautauftreten bereits vor der Saat minimieren oder verzögern, um das Zweiblattstadium der Zwiebeln für die erste mechanische Maßnahme abwarten zu können, ohne dass die aufgelaufenen Beikräuter zu groß zur effektiven Regulierung sind.

Im Blumenkohlanbau erwies sich die Kombination aus Finger- oder Torsionshacke mit der Gänsefußhacke für die Regulierung zwischen und in den Reihen als deutlich überlegen im Vergleich zur ausschließlichen Bearbeitung mit der Gänsefußhacke. Letzteres ergab eine Reduktion der Beikräuter um 30% (66% bei stärker verunkrautetem Versuchsfeld), während die Kombination mit Fingerhacke eine Reduktion um 58% (bzw. 87%) und bei der

Kombination mit der Torsionshacke eine Reduktion um 57% (bzw. 83%) herbeiführte. Interessant war, dass das Auftreten von Amarant nur durch die Fingerhacke, nicht jedoch durch die Torsionshacke minimiert werden konnte. Signifikante Qualitäts- oder Ertragsunterschiede konnten zwischen den Varianten nicht festgestellt werden. (Zillger und Tschöpe, 2006) Zwischen verschiedenen Hackgeräten in der Reihe, darunter auch Finger- und Torsionshacke, wurden bezüglich des Wirkungsgrades der Beikrautregulierung lediglich Unterschiede von maximal 8% nachgewiesen (Zillger et al., 2011). Im Zwiebelanbau führte die Torsionshacke zu etwas besserer Reduktion von Beikräutern verglichen mit der Fingerhacke, allerdings auch zu höheren Pflanzenverlusten (Ascard und Fogelberg, 2008). Generell wirken bei Beikräutern, die das Keimblattstadium bereits überschritten haben, Reihenhackbürste und Fingerhacke effektiver als die Torsionshacke (Van der Weide et al., 2008). Die richtige Einstellung des Geräts entscheidet über die Reduktion der Beikräuter sowie die dabei in Kauf zu nehmenden Pflanzenschäden bzw. -verluste und ist bei der Torsionshacke von besonderer Bedeutung (Ascard und Fogelberg, 2008). Im Zwiebelanbau hat sich eine Einstellung von 1 cm zwischen den Zinken und 3 cm Arbeitstiefe bewährt (Ascard und Fogelberg, 2008). Mit steigender Aggressivität der Einstellung und mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit (Zinken werden mit steigender Geschwindigkeit weiter auseinander gedrückt) nimmt die Effektivität der Torsionshacke zu, allerdings auch das Risiko, Kulturpflanzen zu beschädigen (Braun, 2011).

Ein Nachteil von Torsion- und Fingerhacke ist die Notwendigkeit der sehr präzisen Steuerung, um einerseits nahe an der Kulturreihe arbeiten und somit auch in der Reihe wirken zu können und andererseits keinen Schaden an der Kulturpflanze anzurichten (van der Weide et al., 2008). Diese akkurate Steuerung bedingt jedoch eine niedrige Arbeitsgeschwindigkeit und daraus resultierend auch eine niedrige Arbeitseffizienz (van der Weide et al., 2008). Zusätzlich dazu wird die Effizienz dadurch verringert, dass durch die notwendige Präzision nicht viele Reihen gleichzeitig bearbeitet werden können (Fogelberg, 2007). Laut Ascard und Fogelberg (2008) ist die Steuerung der Torsionshacke jedoch noch anspruchsvoller als jene der Fingerhacke, da letztere bei Ungenauigkeit weniger Schaden verursacht als die Torsionshacke. Für die exakte Steuerung ist häufig eine zweite Arbeitskraft von Nöten, welche den Kostenaufwand erhöht (Melander et al., 2005). Trotzdem lohnt sich der Einsatz von Torsions- und Fingerhacke, denn der Arbeitsaufwand für das Handjäten wird dadurch um 40 bis 70 Prozent reduziert (nicht zulässig, wie eben Tabelle 3, van der Weide et al., 2008). Verglichen mit dem Striegel verursachen beide Geräte außerdem weniger Schäden an den Kulturpflanzen (van der Weide, 2008). Ein weiterer Vorteil von Torsions- und Fingerhacke ist die Möglichkeit der Kombination

mit einem Hackgerät in der Reihe (van der Weide et al., 2008). Aufgrund der recht niedrigen Arbeitsgeschwindigkeiten eignen sich Torsions- und Fingerhacke sowie Reihenhackbürste vorwiegend für höherpreisige Gemüsekulturen (Melander et al., 2005). Eine Fahrgeschwindigkeit von 3,8-5,4 km/h und somit eine erhöhte Effizienz erzielte gegenüber einer Geschwindigkeit von 1,5-3 km/h eine bessere Beikrautregulierung ohne die Zahl der Pflanzenschäden zu erhöhen, allerdings liegen dazu keine signifikanten Ergebnisse vor (Ascard und Fogelberg, 2008).

Tabelle 3: Zahl der Arbeitsstunden für das Handjäten der verbleibenden Beikräuter nach verschiedenen mechanischen Maßnahmen. Quelle: modifiziert nach van der Weide et al. (2008)

Table 3 Number of hours ha⁻¹ for hand weeding to control remaining weeds after mechanical weed control with different implements in direct-sown or transplanted onions (data from Bleeker, 2003, 2005, 2006)

| Implement | Direct sown | | | Transplanted |
|-------------------|-------------|------|------|--------------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | 2004 |
| Hoeing | 188 | 108 | 79 | 30 |
| + Finger weeding | 78 | 56 | 41 | 9 |
| + Torsion weeding | 99 | 38 | | |
| + Finger/torsion | | 39 | 42 | |
| + Pneumat | | | | 8 |
| + Sarl Radis | | | | 7 |

Alle Hackgeräte (Gänsefuß-, Stern-, Finger-, Torsionshacke etc.) haben gemeinsam, dass ihr Wirkungsgrad stark von den Bodenbedingungen wie beispielsweise der Verschlämmung, Verkrustung etc. abhängt (Zillger et al., 2011). Unter schlechten, d.h. verkrusteten und verschlammten Bodenbedingungen verzeichnete die Torsionshacke von allen Geräten die größten Einbußen in der Effektivität (Zillger et al., 2011). Des Weiteren sinkt die Effektivität der Beikrautregulierung mit Hackgeräten mit zunehmender Größe der Beikräuter (Ziller et al., 2011). Daraus lässt sich schließen, dass die Effektivität wie bei allen mechanischen Maßnahmen entscheidend vom Einsatzzeitpunkt abhängt. Dieser wiederum ist an die Witterungsbedingungen gekoppelt, wodurch die Effektivität von Jahr zu Jahr teils stark schwanken kann. Schlussendlich lässt sich aufgrund der großen Abhängigkeit mechanischer Maßnahmen von externen Faktoren eine relativ niedrige Robustheit feststellen.

Allen weiteren, teils abgewandelten Geräteformen, zu denen keine oder nur wenig wissenschaftliche Literatur bezüglich der in dieser Arbeit behandelten Kriterien gefunden wurde, wie beispielsweise die Reihenfräse, der Flachhäufler oder das Duo-Parallelogramm, werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

2.4.1.2 Automatisierte Lenksysteme und Roboter

Bei den computergesteuerten Geräten ist zwischen den autonomen Robotern und den in Kombination mit einem Zugfahrzeug arbeitenden Geräten mit automatisierten Lenksystemen zu unterscheiden.

Zu letzterem gehören beispielsweise Reihenführungssysteme mittels Sensorkamera oder Real Time Kinetic (RTK), aber auch kameragestützte Beikrautregulierungsgeräte, welche die Kulturpflanzen von Beikräutern unterscheiden können (z.B. Okio-Kamera) und Ultraschallsysteme (Staub, 2018; Heuberger, 2015). Die Bilddaten werden verarbeitet und die Hacktechnik mittels Verschieberahmen entsprechend gesteuert (Staub, 2018). Beikrautregulierungsmaßnahmen, die mithilfe von GPS-Steuerung durchgeführt werden, sind effizienter, da eine schnellere (bis 9 km/h) und präzisere (mit RTK-Korrektur +/-2,5 cm) Bearbeitung möglich ist (Heuberger, 2015). RTK-GPS Systeme haben gegenüber sensor- und kamerabasierten Systemen den Vorteil, dass die Diversität und Quantität der Beikräuter, aber auch die Veränderung der Kulturpflanze im Laufe der Entwicklung keine Rolle spielen (Pérez-Ruiz et al., 2012). Allerdings ist dafür ein guter Empfang des GPS- und Korrektursignals notwendig (Staub, 2018). Griepentrog und Dedousis (2010) betrachten die Kombination aus GPS- bzw. RTK-Steuerung und Kamera- bzw. Sensorgestützten Systemen, bei welcher sich die Vor- und Nachteile der relativen und absoluten Erkennungssysteme kompensieren, als am vielversprechendsten für die Zukunft. Verglichen mit der manuellen Steuerung kann der unbearbeitete Bereich bei automatischer Steuerung von etwa 14 cm auf etwa 7 cm (Versuch mit Karotten und Rote Beete) reduziert werden (Staub, 2018). Im Vergleich zur Hacktechnik im Zwischenachsenbau, welche ähnlich präzise Ergebnisse erreicht, sind mit automatischen Steuerungssystemen höhere Geschwindigkeiten und größere Arbeitsbreiten möglich, was zu erhöhter Effizienz führt (Staub, 2018). Durch die größeren Reihenbreiten entstehen weniger Fahrspuren und bei angepasstem Maschineneinsatz folglich weniger Verdichtung (Schwarz und Hege, 2014). Zusätzlich wird der Fahrer entlastet (Staub, 2018). Neben der höheren Flächenleistung minimieren GPS-basierte Geräte normalerweise die Beschädigungen an Pflanzen und machen ein Blind-Hacken zwischen den Reihen möglich, wodurch das Abflammen auf den Bereich in der Reihe reduziert werden kann (Schwarz und Hege, 2014). Ausnahmen bei der Beschädigung der Pflanzen sind beispielsweise an Schlägen mit starkem Gefälle möglich, wo die Abdrift der Maschinen nicht mehr mit dem Verschieberahmen ausgeglichen werden kann (Staub, 2018). Laut Melander et al. (2015) sind das Ausmaß der Schädigung der Kulturpflanze und die damit verbundenen Ertragseinbußen beim Einsatz

computergesteuerter Geräte sowohl bei Steckzwiebeln als auch bei Kohl mit traditionellen mechanischen Geräten vergleichbar (Melander et al., 2015).

Automatisierte Geräte mit Pflanzenerkennung (wie z.B. Sensortechnik) sind besonders in Anbausystemen mit Setzlingen effektiv, da sich die Setzlinge aufgrund des Wachstumsvorsprungs optisch stark von Beikräutern unterscheiden (Pannacci et al., 2017). Diese Feststellung machten auch Bleeker et al. (2007), die ein innovatives Hackgerät, welches die Kulturpflanze anhand eines Lichtsensors erkennt und dann zwischen den Kulturpflanzen in der Reihe hackt, erprobten. Ziel des Versuchs war es, das Gerät im Vergleich mit dem Steckzwiebelanbau kostengünstigeren Säckzwiebelanbau zu testen. Es wurden auf verschiedene Arten Zwiebeln in kleinen Gruppen von 3 bis 6 gesät, um zwischen den Gruppen größeren Platz für das in die Reihe hackende Gerät zu schaffen. Doch aufgrund der schlechteren Erkennung der kleinen gesäten Zwiebelpflanzen entfaltete das Gerät nicht die gleiche Wirkung wie bei gepflanzten Zwiebeln (Bleeker et al., 2007). Ein derartiges System mit Pflanz- oder Steckzwiebeln in kleinen Gruppen, welche optisch leichter von Beikräutern unterscheidbar sind, könnte jedoch durchaus eine gute Möglichkeit sein, um selektive Geräte, welche in der Reihe arbeiten, im Zwiebelanbau einzusetzen. Bisher ist dies aufgrund der oft kleinen Abstände in der Reihe häufig nicht möglich. In der Reihe arbeitende Geräte, die auf dem Mechanismus schnell bewegter Schare basieren, verursachen große Umwälzungen des Bodens, welche im Einsatz in der Reihe erwünscht sind (Tillett et al., 2008). Das von Griepentrog et al. (2006) entwickelte Gerät mit einem, um die Kulturpflanze herum rotierenden Zinkenring vermeidet diese starken Bodenbewegungen, stellt allerdings technisch eine Herausforderung dar. Ein weiterer bereits wissenschaftlich untersuchter Mechanismus besteht aus einer Scheibe, die horizontal um die Kulturpflanze rotiert und somit sowohl in als auch zwischen der Reihe arbeitet (Griepentrog und Dedousis 2010). Versuche mit dem Prototyp von *Garford Farm Machinery* (Land) in gepflanztem Kohl (30 x 30 cm Pflanzabstand) belegten die sehr hohe Effektivität dieses Gerätes. In einem Radius von 8 cm um die Pflanze wurden 60% und in einem weiteren Radius 80% der Beikräuter eliminiert (Griepentrog und Dedousis, 2010). Die Funktionsweise mit um die Kulturpflanze herumrotierenden Scheiben, wie sie auch im *Robocrop Inrow Weeder* von *Garford* (Land) Anwendung findet, wurde auch von Tillett et al. (2008) auf den Prüfstand gestellt. In gepflanztem Kohl wurde unter normalen Anbaubedingungen und üblichem Beikrautbesatz 65 bis 87 Prozent der Beikräuter in einem Radius von 24 cm entfernt (Tillett et al., 2008). Die Zahl der beschädigten Pflanzen war insgesamt sehr niedrig, jedoch konnte festgestellt werden, dass ein bodenbedeckender

Beikrautbesatz das visuelle Erfassen der Kulturpflanzen auf Boden-Hintergrund erschwerte und somit den Pflanzenschaden leicht erhöhte. Des Weiteren könnte die Ausweitung der nicht bearbeiteten Fläche (80 mm im Versuch) mit zunehmendem Kulturpflanzengröße den Pflanzenschaden minimieren (Tillett et al., 2008). Es ist anzumerken, dass die Arbeitsgeschwindigkeit mit 1,8 km/h durchaus verbesserungswürdig ist (Tillett et al., 2008). Ein Versuch mit dem computergesteuerten Gerät *Robovator* (Firma, Land) mit kameragesteuerter Detektion der Kulturpflanzen ergab in gepflanztem Kohl nur eine leicht höhere Wirkung als traditionelle mechanische Geräte (Torsions-, Fingerhacke) und eine annähernd gute Beikrautregulierungswirkung wie die mit Herbiziden behandelte Kontrolle (Melander et al., 2015). Das lag mitunter eventuell auch an den trockenen Witterungsbedingungen des Versuchsjahrs (2013), welche die Wirkung der mechanischen Methoden gegenüber den bodenapplizierten Herbiziden begünstigte (Melander et al., 2015). Für das gleiche Gerät konnten Tillett et al. (2008) in einem Radius von 2,4 cm um gepflanzte Kohlpflanzen eine Bekämpfungsrate von 62% bis 87% nachweisen. Ein 2010 durchgeführter und 2011 wiederholter Versuch mit Steckzwiebeln ergab keine signifikanten Unterschiede in der Effektivität der Beikrautregulierung zwischen traditionellen mechanischen Geräten (Hacke, Torsions-, Fingerhacke) und dem *Robovator* (Melander et al., 2015). Die Arbeitsgeschwindigkeit hatte keinen Einfluss auf den Wirkungserfolg. Die unterschiedlichen Boden- und Witterungsbedingungen in den beiden Versuchsjahren scheinen den Bekämpfungserfolg mehr beeinflusst zu haben als die Wahl des Bearbeitungsgeräts (Melander et al., 2015). Dies lässt darauf schließen, dass zwei Versuchsjahre für derartige Feststellungen zu knapp sind und ein Vergleich traditioneller und computergesteuerter Geräte über mehrere Versuchsjahre durchgeführt werden müsste. Melander et al. (2015) stellten fest, dass der *Robovator* zwar in der Reihe etwas weniger Fläche bearbeitet als traditionelle, nicht auf automatische Steuerung basierte Geräte (Finger-, Torsionshacke), aufgrund seiner höheren Effektivität aber zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Die höhere Effektivität ist durch den späteren optimalen Einsatzzeitpunkt (2- bis 4-Blatt-Stadium), wenn bereits mehr Beikräuter aufgelaufen sind, begründet. Insgesamt ist der *Robovator* als Vertreter der sogenannten intelligenten Geräte laut Melander et al. (2015) anderen klassischen in der Reihe regulierenden Geräten wie der Torsions- oder Fingerhacke nicht überlegen. Die Kosten für den *Robovator* sind allerdings pro Reihe 13-mal höher als jene für beispielsweise eine Fingerhacke (Melander et al., 2015). Heuberger (2015) ermittelt gerade die hohen Anschaffungspreise automatisierter Geräte als wichtigsten Hinderungsgrund deren Nutzung. Die derzeitige Entwicklung zeigt jedoch, dass die Preise mit zunehmender Nachfrage sowie dem Fortschritt der Technik sinken

und in Zukunft ein niedrigeres Preisniveau zu erwarten ist. GPS-basierte Steuerungssysteme bieten jedoch auch ohne die Anschaffung technisch aufwendiger und teurerer Geräte neue Potenziale zur Regulierung der Beikräuter in der Reihe. Beispielsweise könnte mit gewissen Sä- oder Pflanzmustern (z.B. 40 x 40 cm bei Kohlgemüse) mit GPS-Steuerung exakt gepflanzt werden und dann in 90 Grad-Winkel zur Pflanzrichtung gehackt werden (Melander, 2014). Pérez-Ruiz et al. (2012) haben die Tauglichkeit des GPS-RTK-Steuerungssystem auch für Regulierungsmaßnahmen in der Reihe nachgewiesen. In ihrem Versuch stellte sich heraus, dass wenig Informationen für den idealen Radius von rotierenden Messern um die Kulturpflanze bekannt ist (Pérez-Ruiz et al., 2012). Die Kenntnis dieser Schnittstelle, die ein Kompromiss aus Konkurrenz durch Beikräuter und Beschädigung der Wurzeln ist, variiert je nach Kulturpflanze und Entwicklungsstadium und ist essentiell, um die automatische mechanische Beikrautregulierung in der Reihe zu optimieren.

Ein entscheidender Vorteil der computergesteuerten Geräte liegt in der leichteren Handhabung in der Praxis (Melander et al., 2015). Laut Schwarz und Hege (2014), welche unter anderem Versuche mit Sälzweibeln durchführten, trägt die GPS-basierte Steuerung durch die verbesserte Effizienz zur Einsparung von Treibstoff und Zeit und somit Kosten, zu einer besseren CO₂-Bilanz, zu weniger Verdichtung und besseren Bekämpfungserfolgen bei. Laut Staub (2018) können automatische Steuerungssysteme zu einer mit minimiertem Handjäten verbundenen Kostenreduktion von 305 Euro/ha (in Karotten und Rote Beete) führen. Ebenso können in manchen Fällen Kosten dadurch eingespart werden, dass die Beikrautregulierung aufgrund der automatischen Steuerung von nur einer Person durchgeführt werden kann (Melander et al., 2015). Allerdings sind entsprechende Regulierungserfolge nicht allein auf die Steuerungstechnik, sondern auch auf die Auswahl und Einstellung der Hacktechnik und den passenden Anwendungszeitpunkt zurückzuführen (Staub, 2018). Letzterer kann jedoch etwas flexibler gewählt werden, da das Entwicklungsstadium der Beikräuter für einen gelungenen Einsatz mit automatisierter Steuerung etwas weniger bedeutend ist als bei traditionellen mechanischen Verfahren (Melander et al., 2015). Dadurch ist die Robustheit automatisierter Maßnahmen gegenüber traditionellen leicht höher. Die Abhängigkeit der Einsatzfähigkeit und des Wirkungserfolgs von den Boden- und Witterungsbedingungen bleibt jedoch bestehen (van der Weide et al., 2008). Des Weiteren können mechanische Beikrautregulierungsmaßnahmen, ob mit oder ohne automatisierte Steuerung, auf hügeligen sowie windigen Feldschlägen das Erosionsrisiko erhöhen (Van der Weide et al., 2008). Ebenso werden wie bei den klassischen Maßnahmen durch die mechanische Arbeitsweise permanent Beikrautsamen zur Keimung

angeregt und der Boden durch die Maschinenbelastung gleichermaßen beeinflusst (Kleingeräte wie Roboter ausgenommen). Die Einsatzsicherheit, also die Zuverlässigkeit wird durch zu hohen Beikrautdruck bzw. Beikräuter, die der Kulturpflanze stark ähneln oder im gleichen Wachstumsstadium sind, starke Staubentwicklung bei der Bearbeitung und teilweise auch Beschattung durch starke Blattbildung, hohe Kulturpflanzen (Kamera-/Sensorerkennung wird minimiert) sowie Seitenwind (Kulturreihe wird von Erkennungssystemen falsch wahrgenommen) reduziert (Berndl, 2016). Durch die Kombination verschiedener Erkennungssysteme oder die Kombination aus GPS- und bildgestützter Steuerung kann die Zuverlässigkeit der Technik erhöht werden, allerdings hat dies durch die hohen Investitionskosten auch seinen Preis.

Computergesteuerte Maßnahmen haben im Bereich der nicht-chemischen Beikrautregulierung sehr hohes Potenzial und könnten in Zukunft auch innovative Anbausysteme mit reduzierter Bodenbearbeitung (bspw. Strip Tillage) im nicht-chemischen Feldgemüsebau ermöglichen, da die klassischen mechanischen Maßnahmen dort starke Anpassungen erfordern oder teilweise nicht möglich sind.

Robotik

Selbstfahrende Roboter werden sowohl zur präzisen Abgabe von Herbiziden als auch zur mechanischen Beikrautregulierung eingesetzt. Beispiele dafür sind der *Thorvald* von *Saga Robotics* (Land), *Naïo Dino* von *Naïo Technologies* (Land) oder der *Bonirob* von *Deepfield Robotics* (Land). Diese drei zeichnen sich durch hohe Mobilität aus, an allen vier Rädern befindet sich ein Antrieb und eine Steuerung, was eine freie Navigation in alle Richtungen ermöglicht (Utstumo et al., 2018). Damit gehen insgesamt acht Motoren einher, was sich bei den Kosten und dem Energieverbrauch bemerkbar machen. Andere Modelle mit weniger Antrieb und Steuerungen sind weniger flexibel, dafür kostengünstiger. Um ausreichende Manövrierfähigkeit sicherzustellen, wurde angenommen, dass kleine, selbstarbeitende Roboter mit einer Geschwindigkeit von 2 km/h arbeiten (Gaus et al., 2017). Bei dieser Geschwindigkeit ist die Flächenleistung natürlich sehr gering. Laut Gaus et al. (2017) liegt der Energiebedarf bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 2 km/h bei ca. 2,9 kWh/ha. Da autonome Roboter nicht auf eine Arbeitskraft angewiesen sind sowie auch ein vergleichbar geringes Gewicht aufweisen, können sie flexibler eingesetzt werden. Bei gutem Monitoring und der Kenntnis über gegebenenfalls bestehende Beikrautnester können Roboter die Effizienz des nicht-chemischen Beikrautmanagements deutlich verbessern. Besonders für Hackfrüchten und Gemüsekulturen

mit ausreichenden Reihenbreiten stellen die Roboter hohes Potenzial dar. Das wird durch die 250 Euro Pestizidkosten pro Hektar deutlich, die im Zuge der mechanischen Beikrautregulierung mit selbstfahrenden Kleinmaschinen in Zuckerrüben eingespart werden konnten (Gaus et al., 2017).

Bezüglich innovativer Geräte stößt diese Arbeit an ihre inhaltlichen Grenzen, da derzeit zwar viele neue Geräte in Entwicklung oder marktreif sind, aber selten bereits wissenschaftliche Daten zur deren Eignung und Merkmalen vorliegen. Ein großer Teil der Literatur zu intelligenten Systemen behandelt nicht die Praxisanalyse bereits marktreifer Geräte, sondern beschreibt neuentwickelte Geräte oder Systeme.

2.4.2 Mulchen

Das Mulchen zur Unkrautunterdrückung basiert darauf, dass der Boden vor Licht geschützt wird, um dadurch die Keimung von Beikräutern zu unterdrücken (Laber, 2009). Zusätzlich dazu kann organisches Mulchmaterial wie beispielsweise Klee gras, bodenverbessernd wirken und Nährstoffe eintragen (Pannacci et al., 2017; Laber, 2009).

Das Mulchen mit Haferstroh beziehungsweise Heu (*Phleum pratense* L.) etwa fünf Wochen nach der Pflanzung von Zwiebeln ergab in einem 2014 durchgeführten und 2015 wiederholten Versuch eine sehr niedrige Beikrautmasse zum Ende der Saison (Brown und Gallandt, 2018). Der Arbeitsaufwand war mit drei bis viermaliger mechanischer Beikrautregulierung vor dem Mulchen, manuellem Verteilen des Mulchmaterials in den Reihen und einmaliger manueller Beikrautregulierung nach dem Mulchen entsprechend sehr hoch. Bei der Strohvariante wurden 711 keimfähige Samen pro Quadratmeter gemessen, davon größtenteils Hafersamen, die mit dem Mulch eingetragen wurden und darauf keimten. Von den mit dem Heu eingetragenen 991 keimfähigen Samen pro Quadratmeter keimten dagegen nur wenige. Verglichen mit vier anderen Beikrautmanagementstrategien schnitten die Stroh- und Heumulchvarianten bezüglich der Aussamung von Beikräutern sehr gut ab (Brown und Gallandt, 2018). Weniger erfolgreich waren die Versuche von Boyhan et al. (2006) mit verschiedenen natürlichen Mulchmaterialien im ökologischen Zwiebelanbau. Alle Materialien erwiesen sich teilweise aus verschiedenen Gründen als nicht effektiv gegen Beikräuter bzw. als ertrags- oder qualitätsmindernd (Zwiebelgröße). Beispielsweise bereitete der schmale Abstand zwischen den Reihen bei den Strohvarianten Probleme bei der Mulchabfuhr und ein Pflanzen in den Mulch erwies sich auch nicht als erfolgreich. Kompost unterdrückte Beikräuter anfangs gut, förderte anschließend

möglichweise durch seine Nährstoff- und Bodenverbessernde Wirkung jedoch die Keimung von Beikräutern (Boyhan et al., 2006). Bei einem weiteren Versuch mit Strohmulch war der Zwiebelertrag verglichen mit einer Herbizidkontrolle geringer, was eventuell auf die Beikrautkonkurrenz, aber auch auf eine nachgewiesene Verringerung der Bodentemperatur und eine Entwicklungsverzögerung im Jugendstadium zurückzuführen ist (Lešnik et al., 2018). Zwischen den drei Testvarianten führte der späteste Ausbringungstermin (25.04.) mit der dickeren Mulchschicht (8 cm) zum höchsten Ertrag. Bezüglich der Verwendung von Stroh ist anzumerken, dass dieses genauso wie Rindenmulch eine Stickstoffimmobilisierung verursachen kann und daher nur in ganz bestimmten Kulturen eingesetzt werden sollte, wozu üblicherweise weder Kohl- noch Zwiebelgemüse zählt (Laber, 2009). Deshalb könnte eine Ertragsverminderung bei Mulcheinsatz auch immer auf Stickstoffmangel zurückführbar sein. Dementsprechend sind beim Mulchen mit entsprechenden Materialien Nährstoffanalysen und daran orientierte zusätzliche Düngemaßnahmen empfehlenswert.

Zusätzlich zu organischem Mulchmaterial stehen mit Papier, abbaubarem Unkrautvlies, einmal verwendbarer Polyethylen-Folie und mehrfach verwendbarem Polypropylen-Gewebe noch weitere Mulchmaterialien zur Regulierung von Beikräutern zur Verfügung. In der biologischen Kohlproduktion wird beispielsweise Polyethylenfolie verwendet, obwohl sie bei jeder mechanischen Beikrautregulierung oder anderen Arbeitsschritten entfernt werden muss und somit zu erhöhtem Arbeitsaufwand führt (Tei et al., 2005). In Spanien wird die Folie bei Sommerkohl mit Tröpfchenbewässerung kombiniert (Tei et al., 2005). Bei Reid und Cohen (2013) hat sich der Einsatz schwarzer Polyethylen-Folien als effiziente und langanhaltende Beikrautregulierungsmethode im Zwiebelanbau erwiesen, welche auch zur Veränderung der Beikrautflora führte. Allerdings ist dieses Ergebnis aufgrund der Durchführung in Jamaica und der dortigen Strahlungs- sowie Bodenwasserverhältnisse nur begrenzt auf den mitteleuropäischen Zwiebelanbau übertragbar. In dem von Brown und Gallandt (2018) durchgeführten Versuch schnitt Polyethylenfolie bezüglich der Unkrautmasse am Ende der Saison wesentlich schlechter ab als die Stroh- und Heuvarianten. Die Reihen wurden fünf Mal mechanisch bearbeitet, in den Pflanzlöchern (5 cm) wurde dreimal handgejätet (Brown und Gallandt, 2018). Laut der Autoren würden kleinere Pflanzlöcher den Beikrautbefall dezimieren, allerdings wäre das nur mit arbeitsaufwendigerem händischen Pflanzen möglich (Brown und Gallandt, 2018). Zu vermerken ist auch, dass die Regulierung monokotyler Beikräuter in den Pflanzlöchern zusätzliche Erschwernisse bereitet hat (Brown und Gallandt, 2018). Bezüglich des Ertrags des 2014 und 2015 durchgeführten Versuchs wurden die besten Ergebnisse von der

Heumulchvariante und einer Variante, bei der während der gesamten Wachstumsperiode alle zwei Wochen mechanische Beikrautregulierung durchgeführt wurde, erzielt. Obwohl diese beiden Varianten mit den höchsten Kosten verbunden waren, waren sie schlussendlich aufgrund der hohen Erträge am profitabelsten (Brown und Gallandt, 2018). Die Mulchvarianten weisen weniger variable Erträge auf und werden deshalb als weniger risikoreich beschrieben, allerdings ist eine Wiederholung für diese Folgerung eventuell nicht aussagekräftig genug. Lennartsson et al. (1990) haben auf einem zuvor für Futterbau genutzten Feld mit verbliebenen Futterpflanzenstoppeln verschiedene Mulchmaterialien und eine Variante, bei der gefräst wurde, verglichen. Während der Bedeckung des Bodens wurde Rosenkohl gepflanzt. Nach zwölf Monaten wurden die Abdeckmaterialien entfernt und ohne weitere Bearbeitung Zwiebeln gepflanzt. Verglichen mit der Fräs-Variante wurde bei allen Mulchmaterialien ein auffallend niedrigerer Unkrautbesatz während der für Zwiebeln wichtigen Entwicklungsstadien nachgewiesen. Auf der Heuvariante wurden die höchsten, auf der Variante mit Polyethylenfolie die zweithöchsten Zwiebelerträge erwirtschaftet. Diese beiden Materialien schnitten auch bei den Rosenkohlerträgen am besten ab, waren aber arbeitswirtschaftlich weniger vorteilhaft wie Kunststofffolie und Mulchteppich (Lennartsson et al., 1990). Ein Versuch, bei welchem Heu und verschiedene Arten von Mist vor der Pflanzung unter schwarzer Polyethylenfolie kompostiert wurden, ergab beim anschließenden Anbau auf unbedeckter Erde 15 bis 40 Prozent weniger Beikrautbefall im Vergleich zur Kontrolle (Irmaileh und Rayyan, 2008). Rindermist und Heu führten zu besseren Ergebnissen als Schafmist. Das Bedecken mit Vlies im Zwiebeldirektsaatanbau zum anschließend effizienteren Abflammen hat sich bisher nicht bewährt. Zwar kann die Vliesabdeckung zur Förderung der Keimung von Beikräutern führen, allerdings ohne das darauffolgende Abflammen effektiver gestalten (Koller, 2011). Stattdessen kann es sogar zu einem erhöhten Aufwand des Handjärens kommen (Koller, 2011).

Mulch kann eine sehr gute ergänzende Maßnahme zur Beikrautregulierung in nicht-chemischen Gemüsebausystemen aufweisen, die jedoch effektiver gegen einjährige Samenbeikräuter als gegen mehrjährige Wurzelbeikräuter ist (Lešnik et al., 2018; Pannacci et al., 2017). Neben der Effektivität gegen Beikräuter hat sich das Mulchen im Zwiebelanbau bei Hussain et al. (2017) auch als ertragssteigernd herausgestellt. Die Effektivität des Mulchs hängt entscheidend von der Dicke des Mulchs ab (Pannacci et al., 2017). Selbst bei gegebener Effektivität leidet die Effizienz durch den hohen Materialaufwand und -verschleiß sowie den Arbeitsaufwand zur Verlegung des Mulchmaterials. Probleme beim Mulchen mit frischer Biomasse können bei Schneckenbefall oder bei einer unzureichend hohen Mulchschicht entstehen. Denn wenn

Beikräuter durch die Mulchschicht wachsen, können die üblichen mechanischen Beikrautregulierungsmaßnahmen nicht mehr erfolgreich angewendet werden (Carr et al., 2013; Laber, 2009). Zu dem recht rezenten Thema der reduzierten Bodenbearbeitung in nicht-chemischen Anbausystemen, bei dem das Mulchen die wichtigste Maßnahme der Beikrautregulierung ist, liegen noch nicht viele Studien mit Bezug auf Gemüsebau vor. Allerdings hat sich bereits herausgestellt, dass bei derartigen Systemen sehr große Mengen an Mulchmaterial benötigt werden (Carr et al., 2013). Des Weiteren lässt die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchs mit der Zeit nach, wodurch hauptsächlich für die frühen Entwicklungsstadien, nicht aber für längere Vegetationszeiträume eine Beikrautregulierung gewährleistet wird (Carr et al., 2013).

Auf den laut Robačar et al. (2016) effektiveren lebenden Mulch, also Untersaaten, wird in Kapitel 2.3.2. eingegangen.

2.4.3 Elektrische Beikrautregulierung

Beikräuter, die über den Bestand herausragen, gilt es unter anderem aus folgenden beiden Gründen zu entfernen: Sie haben aufgrund ihrer Größe Wettbewerbsvorteile in Bezug auf Licht, Wasser und Nährstoffe und gefährden somit die Ertragsbildung. Des Weiteren besteht aufgrund des Entwicklungsvorsprungs die Gefahr des Aussamens. Mithilfe von Stromstößen, die von Elektroden ausgehen, werden alle Pflanzen einer gewissen Höhe durch Zellerhitzung abgetötet. Die Höhe der Elektroden wird so eingestellt, dass nur über den Kulturpflanzenbestand herausragende Pflanzen erfasst werden (Jüttersonke, 2000).

Die stromleitenden Drähte, bei deren Kontakt eine Pflanze durch Zellerhitzung stirbt, sind veränderbar. Sie können sowohl ganzflächig als auch auf den Zwischenreihenraum begrenzt werden. Ein Schwachpunkt der elektrischen Beikrautregulierung ist die Anschaffung des benötigten Geräts. In Anbetracht dessen, dass es bei einem üblichen Beikrautregulierungsmanagement nur in Ausnahmefällen zu einem den Kulturbestand überragenden Beikrautbefall kommt, lohnt sich die Anschaffung eines betriebseigenen Geräts nur in wenigen Fällen. Der überbetriebliche Einsatz wäre dahingehen von großer Bedeutung, um die Stärke der elektronischen Beikrautregulierung in den genannten Ausnahmefällen nutzen zu können und über den Bestand hinausragende Beikräuter effektiv zu eliminieren und an der Aussamung zu hindern (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994). Laut Pannacci et al. (2017) ist

die elektrische Beikrautregulierung trotz bestehender Forschung nicht praxistauglich und unrentabel.

2.4.4 Thermische Beikrautregulierung

Solarisation

Unter Solarisation wird die Selbsterhitzung des Bodens unter dünnen, transparenten oder schwarzen Kunststofffolien (0,05mm) durch die Sonnenstrahlung verstanden (Pannacci et al., 2017; Campiglia et al., 2000). Transparente Folie erhitzt den Boden um durchschnittlich 4-8°C stärker und gewinnt dadurch an Effektivität (Campiglia et al., 2000). Obwohl diese Methode hauptsächlich zur Eliminierung von Nematoden und Pilzpathogenen eingesetzt wird, sorgen Bodentemperaturen von über 40°C während zwei Wochen auch für die Dezimierung von Beikrautkeimlingen und -samen (Pannacci et al., 2017). Dieses aus Isreal stammende Verfahren kann sowohl ganzflächig als auch auf den Zwischenreihenraum begrenzt angewendet werden (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994).

Laut Jüttersonke (2000) ist die Solarisation allerdings nur in strahlungsreichen Regionen erfolgsversprechend, da die Effektivität mit zunehmender Hitze und Länge der Einwirkung steigt (Campaglis, 2000). Deshalb sind die erfolgsversprechenden Ergebnisse der Untersuchungen von Reid und Cohen (2013) aus Jamaica, bei denen sowohl der Einsatz von transparenter als auch schwarzer Folie über etwa sechs Wochen die Verunkrautung über fünf folgende Wochen um 56% dezimierte, eventuell nicht auf europäische Strahlungs- und Witterungsverhältnisse übertragbar. Auch eine Studie, die die Reduktion der Beikrautdichte um 93% bei Karfiol und eine Ertragssteigerung um 47% belegt, stammt aus Mittelitalien (Campiglia et al., 2000). Schwachpunkte dieser Maßnahme sind der hohe Materialaufwand und die Abhängigkeit der Effektivität von der Empfindlichkeit der Beikrautarten (Pannacci et al., 2017). Während einjährige Beikräuter bis auf Ausnahmen empfindlich sind, sind viele ausdauernde Beikräuter nur relativ empfindlich bis tolerant (Pannacci et al., 2017). Beikrautarten, die aus Tiefen tiefer als 5 cm wieder hervortreten können wie beispielsweise *Solanum nigrum* und *Stellaria media* L. werden nicht effektiv reguliert (Campiglia, 2000). Gegen *Portulaca oleracea* (L.) und *Amaranthus* spp. hat sich schwarze Mulchfolie nur teils, die den Boden stärker erhaltende transparente Mulchfolie aber vollständig wirkungsvoll erwiesen (Campiglia et al., 2000). Laut Pannacci et al. (2017) ist Solarisation auf den Anbau von Gemüsekulturen in Glashäusern wie beispielsweise Karfiol beschränkt.

Heißdampf

Heißdampf könnte in Zukunft vor allem bei Anbausystemen mit Direktsaat von Zwiebeln und Lauch relevant werden. Denn Zwiebel- und Lauchsamen sind unempfindlich auf die hohen durch Heißdampf erreichten Bodentemperaturen und könnten deshalb im gleichen Arbeitsschritt unmittelbar nach der Heißdampfbehandlung gesät werden (Pannacci et al., 2017). Die Heißdampfbehandlung tötet Beikrautsamen und vegetative Vermehrungsorgane ab (Pannacci et al., 2017). Das Einwirken von Temperaturen von mindestens 60°C bis zu 80°C über mehrere Sekunden kann zur Dezimierung von Beikräutern um bis zu 99% führen (Pannacci et al., 2017). Jede Beikrautart hat eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Hitze, weshalb der Wirkungsgrad der Heißdampf-Behandlung von 2 bis 5 Sekunden je nach Pflanzenart von der Höhe der Temperatur abhängt (Pannacci et al., 2017). Auch resistente Beikräuter können durch eine längere Behandlung (6-9 s) bei 70°C eliminiert werden (Pannacci et al., 2017). Heißdampf hat somit eine potenziell sehr hohe Effektivität und reduziert die Samenbank langfristig (Melander et al., 2005). Durch Zugabe von CaO oder KOH, welche zu exothermen Reaktionen führt, kann die Wirkung der Heißdampfbehandlung sogar noch um ein Vielfaches zunehmen (Melander et al., 2005). Nachteile des Einsatzes von Heißdampf sind allerdings der hohe Verbrauch fossiler Rohstoffe und die niedrige Arbeitsgeschwindigkeit (Melander et al., 2005). Hansson und Svensson (2007) erprobten die Effekte des Heißdampfeinsatzes in schmalen Reihen. Lediglich die Reihen, in denen anschließend unter anderem auch Zwiebeln gesät wurden, wurden mit Heißdampf behandelt, was gegenüber einem Einsatz auf dem ganzen Feld zur Einsparung von Energie führte. Auf dem sandigen Boden kam man zu der Erkenntnis, dass für eine Beikrautreduktion von 90% etwa 86°C in 4 cm Bodentiefe notwendig sind. Dafür wurde im Versuch 5700 kWh/ha verbraucht. Die Arbeitseffizienz ist mit 8 Stunden pro Hektar sehr gering (Fahrgeschwindigkeit zwischen 200 und 370 m/h). Trotz der niedrigen Arbeitsgeschwindigkeit und des hohen Bedarfs an Wasser hat Heißdampf in schmalen Reihen beispielsweise in Strip-Tillage-Systemen oder anderen Systemen mit viel Biomasse laut Brainard et al. (2013) Potenzial und Vorteile gegenüber dem Abflammen, da nicht die Gefahr der Entzündung der Biomasse besteht. Auch Melander (2014) ist davon überzeugt, dass Heißdampf in schmalen Streifen bei eng stehenden Kulturen wie beispielsweise Zwiebelgemüse in Zukunft mechanischen Verfahren überlegen sein könnte, auch wenn es noch Bedarf an technischen Verbesserungen und energetischen Einsparungen gibt.

Es kann festgehalten werden, dass Heißdampf eine sehr effektive, aber durch die niedrige Arbeitsgeschwindigkeit wenig effiziente Maßnahme ist, um Beikräuter zu regulieren. Durch den relativ hohen Verbrauch an fossiler Energie und Wasser lohnt sich der Einsatz vorwiegend bei reduziertem Einsatz (bspw. schmale Reihen) und in Systemen, die durch ihren Mehrwert (bspw. Bodenschutz durch reduzierte Bodenbearbeitung, Gemüse mit hohem Marktwert etc.) gekennzeichnet sind.

Abflammen

Gerade in langsam keimenden Kulturen wie gesäten Zwiebeln oder Lauch ist das Abflammen im Voraufverfahren von großer Bedeutung, weniger dagegen in schnell keimenden Kulturen wie Kohlgemüse (Melander et al., 2005). Beim Säzwiebelanbau gilt das Abflammen als die effektivste Beikrautregulierungsmaßnahme und kann den Arbeitsaufwand pro Hektar um 100 bis 200 Arbeitskraftstunden reduzieren (Koller et al., 2007). Die beim Abflammen abgestrahlte Hitze zerstört die Zellmembranen und führt infolge dessen zu einer Vertrocknung des Pflanzengewebes (Melander et al., 2005). Gasgeräte zum Abflammen von Beikräutern werden in Kombination mit der Unkrautkur vor dem Säen oder Pflanzen, im Vorauf beispielsweise bei Zwiebeln und nach dem Auflaufen eingesetzt (Pannacci et al., 2017). In letztem Fall werden für Kulturen wie Kohl Schutzvorrichtung zur Hilfe genommen.

Steckzwiebeln werden üblicherweise bis zum 2-3 Blattstadium (Koller et al. 2007) in einer Wuchshöhe von 5 bis 8 cm (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994) bzw. bis zu 15 cm (Laber, 2009) abgeflammt. Mit angewinkeltem Brenner und bestenfalls Schutzschildern kann bis zu einer Wuchshöhe von 25 bis 30 cm seitlich an der Basis der Zwiebeln abgeflammt werden (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994). Wenn die Beikräuter zu diesem Zeitpunkt allerdings schon weit entwickelt sind, ist dieses späte Abflammen meist nicht sehr effektiv (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994). Steckzwiebeln haben genug Reserven für einen Wiederaustrieb und vertragen das Abflammen in frühen Stadien daher besser als das Striegeln (Koller et al., 2007). Trotzdem empfehlen Koller et al. (2007) das Abflammen nach dem Auflaufen nur im Fall von nicht durch mechanische Methoden regulierbaren Beikrautbefall. Bei gesäten Zwiebeln kann das Abflammen nach dem frühen Bügelstadium die Entwicklung beeinträchtigen oder zu Ausfällen führen (Koller et al., 2007). Gepflanzte Zwiebeln scheinen diesbezüglich wesentlich robuster zu sein. Versuche mit Pflanzzwiebeln zeigten, dass diese sechsmaliges Abflammen (durchschnittlich 12, 25, 35 51,61 und 75 Tage nach dem Pflanzen von 60 Tage alten Zwiebeln

Ende Mai) ohne Ertragsverluste und signifikante Reife- oder Ernteverzögerung überstanden (Sivesind et al., 2012). Verglichen mit beikrautfreien Kontrollen, die zusätzlich handgejädet wurden, lag der marktfähige Ertrag der Zwiebeln, die lediglich abgeflammt wurden bei 37% und der Gesamtertrag bei 80%. Auch mehrmalige Abflammdurchgänge konnten also die Beikrautdichte nicht effizient genug regulieren, um beikrautbedingte Ertragsverluste zu vermeiden. Andererseits hat schon das einmalige, frühzeitige Abflammen einen wesentlich höheren Ertrag ergeben als die unbehandelte Kontrolle. Weitere Abflammdurchgänge reduzierten die Beikräuter dagegen nur in geringerem Ausmaß (Sivesind et al., 2012).

Bei gesäten Zwiebeln wird der Wirkung des Vorauflaufabflammens durch eine tiefe Saat (2-3 cm) verbessert, da der Wachstumsvorsprung des Beikrauts dadurch erhöht wird (Koller et al., 2007). Die höchste Effektivität wird erreicht, wenn das Abflammen unmittelbar vor dem Auflaufen der Kultur durchgeführt wird. Voraussetzung zur Bestimmung des optimalen Zeitpunkts des Abflammens ist eine möglichst exakte gleichmäßige Tiefenablage der Saat (Koller et al., 2007). Nichtsdestotrotz kann die Bestimmung des Einsatzzeitpunktes durch variierende Bodenbedingungen eines Schlags erschwert werden, wenn die Saat dadurch an verschiedenen Stellen unterschiedlich schnell aufläuft (Plagge, 2000). Außerdem kann es selbst bei idealer Bestimmung zur zwangsweisen Verlegung des Einsatzes aufgrund unpassender Witterungsbedingungen kommen.

Eine Schwäche des Abflammens ist die unzureichende Wirkung gegen monokotyle Pflanzen, da deren Vegetationspunkt im Boden geschützt ist (Sivesind et al., 2012; Heilmann und Zimmer, 1999). Dadurch liegt die Effektivität bei der Regulierung von Gräsern wie beispielsweise Hirse nur bei 15 bis 35 Prozent (Jüttersonke, 2000). Andererseits stellt dies in Bezug auf die Zwiebelproduktion gleichzeitig einen Vorteil des Abflammens dar, da auch noch nach dem Auflaufen beziehungsweise auch bei Steckzwiebeln abgeflammt werden kann (siehe Anbaubedingungen). Der Bekämpfungserfolg variiert ja nach Entwicklungsstadium und Morphologie jeder Beikrautart (Pannacci et al., 2017). Je kleiner die Beikräuter, desto empfindlicher sind sie (Pannacci et al., 2017). Generell lassen sich weichere, krautige Beikräuter wie das Franzosenkraut, Vogelmiere oder Amaranth mittels Abflammen gut bekämpfen (Total, 2003). Ausdauernde Beikräuter mit vegetativen Speicherorganen wie die Gewöhnliche Quecke (*Elytrigia repens*) oder die Große Brennessel (*Urtica dioica*) sind durch das Abflammen nicht ausreichend regulierbar (Jüttersonke, 2000).

Bezüglich der Qualität der Zwiebeln haben Sivesind et al. (2012) keine bemerkenswerten Effekte des Abflammens auf die Schärfe und den Gehalt löslicher Substanzen festgestellt.

Bezüglich des Flavonoidgehalts wiesen die Varianten, die zusätzlich zum Abflammen handgejädet wurden, leicht niedrigere Gehalte auf als jene, die lediglich abgeflammt wurden, was darauf schließen lässt, dass andere Faktoren als das Abflammen ausschlaggebend sind.

Auch in gepflanztem Kohlgemüse kann zwischen den Reihen abgeflammt werden. Bei Versuchen dazu hat sich herausgestellt, dass das Abflammen am Vormittag deutlich effektiver ist, allerdings den Kohl auch deutlich stärker in Mitleidenschaft (mehr als 60% beschädigte Pflanzen 5 Tage nach dem Abflammen) zieht als das Abflammen am Nachmittag (weniger als 10%). 20 Tage nach dem Abflammen hatten sich fast alle Pflanzen regeneriert, allerdings war die Ernte letztendlich um 14 Tage verzögert. Dies kann bei Vertragsanbau eine entscheidende Einschränkung sein. Arbeitsgeschwindigkeiten von 4 km/h (94% kontrollierte Beikräuter nach 5 Tagen, jeweils bei Durchführung am Vormittag) waren 8 km/h (83%) und 12 km/h (56%) überlegen. Diese Ergebnisse konnten allerdings nur in einem der beiden Versuchsjahre erzielt werden. Im zweiten, feuchteren Jahr sorgten ein größerer Anteil perennierender Beikräuter und Gräser an der Beikrautpopulation, eine verspätete, Beikräuter begünstigende Pflanzung, eine wetterbedingte Verschiebung des Abflammens und feuchtere Wetterbedingungen für schlechtere Ergebnisse. Ertrag, Kohldurchmesser und -volumen sowie Kopfgewicht waren bei der 4 km/h-Variante höher als bei 8 und 12 km/h. (Wszelaki et al., 2007)

Ein Vorteil des Abflammens liegt ganz klar darin, dass keine chemischen Rückstände in Boden und Wasser verbleiben (Melander et al., 2005). Entgegen der Vermutung, dass sich das Abflammen negativ auf Nützlinge auswirkt, wurde mittlerweile das Gegenteil bewiesen. Niggli und Dierauer (2000) sind bei einem Versuch mit Laufkäfern zu dem Resultat gekommen, dass das Abflammen keine Auswirkung auf Größe und Zusammensetzung der Laufkäferpopulation hat. Außerdem wird durch das Abflammen der Boden nicht umgelagert und dadurch vermieden, dass Beikrautsamen aus tieferen Bodenschichten hervorgehoben werden und keimen (Krug et al., 2002). Das ist der große Pluspunkt des Abflammens verglichen mit mechanischen Maßnahmen. Ein großer Nachteil ist dagegen der hohe Verbrauch an kostenintensiven fossilen Rohstoffen (Melander et al., 2005). Bei Gasgeräten, wie sie üblicherweise eingesetzt werden, werden pro Hektar abgeflammter Fläche 75 -100 kg Flüssiggas verbraucht (Bohne, 2011). Je weiter das Beikraut entwickelt ist, desto höher steigt der Energieverbrauch (Melander et al., 2005). Zur Eliminierung von Beikräuter mit vier bis 12 Blättern wird zwei- bis viermal so viel Energie benötigt wie von Beikräutern vom Keimblatt- bis Vierblattstadium (Melander et al., 2005). Damit verbunden sind die hohen CO₂-Emissionen, die zum einen beim Verbrennen des Gases und zum Zweiten durch das ziehende Fahrzeug entstehen (Jüttersonke, 2000). Das

Abflammen ist mit hohen Arbeitskosten, Kosten für das benötigte Flüssiggas und die Ausstattung verbunden (Pannacci et al., 2017). Die hohen Arbeitskosten entstehen aus der niedrigen Arbeitsgeschwindigkeit und der Notwendigkeit, für zufriedenstellende Ergebnisse mehrmalige Durchgänge durchzuführen (Melander, 2014). Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt je nach Beikrautdichte und -zusammensetzung bei ein bis vier km/h (Bohne, 2011). Dadurch ergibt sich eine geringe Flächenleistung und Effizienz des Abflammens. Letztere ist folglich auch von Beikrautdichte und -zusammensetzung abhängig. Trotz gegebener Effektivität (gegen dikotylen Beikräuter) ist die Effizienz des Abflammens durch den hohen Energieverbrauch, die hohen Kosten und die niedrige Flächenleistung also gering. Aus diesem Grund hat sich das Abflammen wohl bisher auch hauptsächlich in Gemüsebaukulturen durchgesetzt (Melander, 2014). Bezüglich der Sicherheit dieser Maßnahme ist beim Abflammen die Gefahr eines Brandes unter gewissen Umständen (trockene Ernterückstände etc.) zu erwähnen (Melander, 2014). Aus Kosten- und Umweltschutzgründen nehmen Melander et al. (2005) an, dass das Vorauflaufabflammen im Zwiebelanbau durch den Einsatz des Striegels ersetzt werden wird. Bei Lauch hat sich das Abflammen dagegen als wesentlich wirkungsvoller als das Striegeln erwiesen, was mit dem späteren Saattermin im Vergleich zu Zwiebeln und einer darauf resultierenden höheren Anzahl an bekämpfungswürdigen Beikräutern zum Zeitpunkt des Abflammens zusammenhängen kann (Melander et al., 2005). Infolge der Analyse zum Abflammen kann der Schluss gezogen werden, dass bei Zwiebeln eine Kombination aus vorauflauf-, einmaligem Nachauflaufabflammen und mechanischen Verfahren in der Reihe (Torsions-, Fingerhacke) den Beikrautdruck effektiv reduziert und auch die monokotylen Beigräser erfasst, die die thermische Behandlung überstehen.

Laser

Ein von der Deutschen Bundesstiftung für Umwelt (DBU) gefördertes, bis 2021 laufendes Forschungsprojekt lässt vermuten, dass in naher Zukunft auch Fortschritte im Bereich der Lasertechnik zu erwarten sind. Diese Technik hat in der Kombination mit optischer Beikrautererkennung den Vorteil, dass die Wärme gezielt auf den Vegetationspunkt der Beikräuter gerichtet werden kann. Verglichen mit anderen thermischen Maßnahmen könnte somit die Energieeffizienz deutlich zunehmen. Des Weiteren würden die Wirkungen auf den Boden und die Kulturpflanzen durch den gezielt gerichteten Laser minimiert werden, wodurch die Qualität verglichen mit dem jetzigen Stand der Technik beim Abflammen erhöht würde (Laserbasierte Unkrautregulierung, 2019).

Thermische Maßnahmen können durch den Maschineneinsatz genauso wie mechanische Maßnahmen den Boden beschädigen und verdichten, teilweise so stark, dass das Wurzelwachstum der Kulturpflanzen beeinflusst werden kann (Ball, 2006).

2.5 Biologische Maßnahmen der Beikrautregulierung

Unter biologischer Beikrautregulierung versteht man zumeist den Einsatz von Herbivoren wie pflanzenfressender Insekten oder Nematoden sowie Phytopathogenen zur Bekämpfung von Beikräutern (Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994). Aber auch die Nutzung von Substanzen, die als Pflanzen gewonnen werden, sogenannte Bioherbizide, gehört zu den Maßnahmen biologischer Beikrautregulierung (Radhakrishnan et al., 2018). Sowohl mikrobielle als auch pflanzliche Derivate beeinträchtigen dabei durch giftige Ausscheidungen die Zellfunktionen der Beikräuter oder -samen und wirken sich dadurch auf deren Population aus (Radhakrishnan et al., 2018).

Die verschiedenen Methoden der biologischen Beikrautregulierung können zumeist in folgende drei Kategorien zusammengefasst werden (Jüttersonke, 2000):

- Die Förderung von Antagonisten als natürliche Feinde mancher Beikrautarten.
- Die inokulative Methode beruht auf der Bekämpfung von Arten, die häufig eingeschleppt wurden, durch Antagonisten, die aus dem Ursprungsgebiet importiert werden.
- Die Verwendung von natürlich vorkommenden pflanzlichen oder aus Pathogenen (Pilze oder Bakterien) gewonnenen Substanzen als Herbizid (inundative Methode).

Ein Beispiel für letzteres sind verschiedene aus Pilzen und auch aus einem Rhizobakterium entwickelte Substrate zur Dezimierung des im Gemüsebau sehr relevanten Weißen Gänsefuß (*Chenopodium album*). Mit dem Pilz *Ascochyta caulina* konnte der Weiße Gänsefuß unter Feldbedingungen um 70 Prozent reduziert werden. Gegen die im Gemüsebau ebenfalls problematischen Amaranthus Arten (*Amaranthus* sp.) haben sich die Pilze *Alternaria alternata* und *Trematophoma lignicola* sowie der Rüsselkäfer *Lixus subtilis* als wirkungsvoll erwiesen. (Jüttersonke, 2000)

Die Ausscheidung von Substanzen aus Pflanzenbestandteilen, die andere Pflanzen beeinflussen können, wird auch als Allelopathie bezeichnet (Jüttersonke, 2000). Dieses Prinzip der

Allelopathie spielt zwar auch beim Einsatz von Fruchtfolge, Zwischenfrüchten, Mischkultur und Mulch eine Rolle, wird aber hier erneut erwähnt, denn es handelt sich teils um die Basis, teils um Parallelen zur inundativen Methode. Beispiele für Kulturen, die durch Allelopathie die Keimung und Entwicklung von Beikräutern hemmen, sind Gerste, Roggen, Sonnenblumen, Hafer und Buchweizen sowie Produkte daraus (Shah et al., 2016; Kühne et al., 2005; Jüttersonke, 2000; Dierauer und Stöppler-Zimmer, 1994). Ebenso sollen Hirse, Reis und Weizen allelopathisch wirken, beziehungsweise unkrautunterdrückende Sorten dieser Pflanzenarten bekannt sein (Jabran et al., 2015). Durch die Verwendung dieser Pflanzen in der Fruchtfolge könnte das Auftreten von Beikräutern gehemmt werden, auch wenn die allelopathischen Substanzen in ihrer extrahierten Form eine größere Wirkung versprechen (Kühne et al., 2005). Problematisch bezüglich der Wirkung allelopathischer Substanzen, die häufig in geringen Konzentrationen vorkommen, ist deren mehr oder weniger starke Sorption durch Bodenkolloide (Jüttersonke, 2000).

Bei der inokulativen Methode besteht das Risiko, dass eingeschleppte Wirkorganismen nicht nur die angestrebten zu bekämpfenden Pflanzen, sondern auch Kulturpflanzen angreifen (Cai und Gu, 2016). Deshalb unterliegt diese Methode strengen Vorschriften und die Entwicklung geeigneter Wirkmechanismen ist aufwendig und teuer (Cai und Gu, 2016). Bioherbizide basieren dagegen auf Organismen, die bereits in der Zielfauna vorkommen (Cai und Gu, 2016). Ein weiterer Unterschied ist die gewünschte Vermehrung: während sich die Organismen bei der inokulativen Methode in der Natur selbst verbreiten sollen, werden Organismen, die als Bioherbizide eingesetzt werden, im Labor vermehrt und anschließend gezielt angewendet (Cai und Gu, 2016). Die klassische inokulierende Methode ist im Gemüsebau aufgrund der hohen Vielfalt an Kulturen und Beikrautspezies schwierig zu handhaben (Pannacci et al., 2017). Die inundative Methode ist praxistauglicher, birgt jedoch Probleme bei der Vermarktung, da entsprechende Produkte für viele Gemüsekulturen zugelassen werden müssten, um wirtschaftlich rentabel zu sein (Pannacci et al., 2017). Auch die Vielfalt an bekämpfungswürdigen Beikräutern erschwert die Entwicklung und Wirtschaftlichkeit von Bioherbiziden (Pannacci et al., 2017). Des Weiteren wirkt die kleinflächige Bewirtschaftungsstruktur, durch welche die europäische Landwirtschaft geprägt ist, der Ausbreitung biologischer Methoden entgegen (Tei und Pannacci, 2008). Ein Problem des Einsatzes biologischer Maßnahmen ist die Gefahr, dass nach der Regulierung des dominanten Beikrauts die Kulturpflanze nicht oder nur unzureichend gefördert wird und andere, bisher nur in geringem Maße vorkommende, Beikräuter eine dominante und problematische Stellung

einnehmen und das bekämpfte Beikraut ersetzen (Liebman et al., 2001). Diese Problematik wird durch die Wirkungsspezifität, also dass beispielsweise ein Pilzpathogen nur eine bestimmte Beikrautspezies angreift, noch verstärkt (Jüttersonke, 2000).

Trotz fortschreitender Forschung zu biologischer Beikrautregulierung gelingen bei vielen Versuchen unter Feldbedingungen nicht die gleichen Bekämpfungserfolge wie im Labor oder Gewächshaus, was auf eine Abhängigkeit von gewissen Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit zurückzuführen ist (Cai und Gu, 2016). Außerdem variiert die Wirksamkeit je nach Pflanzenempfindlichkeit und Menge bzw. Aufbereitung (Zwenger und Ammon, 2002). Das wirkt sich einerseits negativ auf die Effektivität aus und andererseits auf die Robustheit. Wenn beispielsweise nicht die gewünschten feuchten Bedingungen vorherrschen, müssen spezielle Formulierungen entwickelt werden, welche die Wirkung gewährleisten (Cai und Gu, 2016). Daraus kann gefolgert werden, dass die Effektivität zukünftiger Formulierungen von deren Umweltabhängigkeit (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) bestimmt wird. Zusätzlich dazu stellen die teilweise kurze Haltbarkeit der Produkte, potenziellen Gefahren für Lebewesen und die hohen Kosten Probleme bei der praktischen Anwendung von Bioherbiziden dar (Cai und Gu, 2016). Aus diesem Grund sind trotz immenser Fortschritte bisher nur sehr wenige Produkte marktreif (Cai und Gu, 2016). Die Kosten, aber auch die schnelle Wirksamkeit sind laut Zwenger und Ammon (2002) Gründe dafür, dass die inundative Bioherbizidmethode hauptsächlich in Intensivkulturen eingesetzt wird. Laut Cai und Gu liegt Potenzial in der Verbesserung der Anwendungstechnik, welche auch die Effizienz der Produkte erhöhen könnte (Cai und Gu, 2016).

Das aus Zitronengräsern (*Cymbopogon sp*) gewonnene Citronella-Öl wirkt durch die enthaltenen Monoterpene ätzend auf ein- und zweikeimblättrige Pflanzen (Massucati et al., 2009). Derzeit liegt der Zweck des Citronella-Öl-Einsatzes in der reduzierten Bodenbearbeitung und hat sich als effektives Mittel zur Eindämmung von Ampfer (*Rumex spp.*) erwiesen (Massucati et al., 2009). In Zukunft könnte es auch eine Alternative zu den derzeit üblichen Vorauflaufverfahren wie dem Abflammen oder dem Blindstriegeln oder zur beikrautregulierenden Saat-/Pflanzbettbereitung darstellen. Laut Verschwele (2007) lassen sich monokotyle und ausdauernde Arten wie beispielsweise Ampfer mit Citronella-Öl, welches im Vergleich mit Pelargon-, Essigsäure und Pinienöl die beste Wirkung zeigte, jedoch nicht langfristig bekämpfen, sondern maximal zurückdrängen, da die Beikräuter nur bei direktem Kontakt erfasst werden. Allerdings müssten dazu noch die Wirkungen des Citronella-Öls auf den Boden und die entsprechende Kulturpflanze, im Fall dieser Arbeit die Zwiebel- und

Kohlgemüsearten, untersucht werden. Laut Massucati et al. (2009) ist eine Hemmung bodenmikrobieller Aktivität unmittelbar nach der Applikation bekannt, welche jedoch unbedenklich sei. Massucati et al. untersuchten nur die Wirkung auf Ampferarten. Es müsste überprüft werden, ob andere Beikrautspezies ebenso wirkungsvoll erfasst werden. Verschwele (2007) wies eine vollständige Keimhemmung von Weizen und Raps bereits bei einer Konzentration von 0,5 % von Nelkenöl, Pinien- oder Citronella-Öl auf. Bei Raps wurde sogar schon bei einer Konzentration von 0,01% in der Keimungsrate reduziert. Es wäre zu überprüfen, ab welcher Konzentration Zwiebelsamen beeinträchtigt werden. Im Falle von gepflanztem Zwiebel- oder Kohlgemüse könnte eine keimhemmende Wirkung vernachlässigt werden.

Neben dem Citronella-Öl gibt es etliche weitere sogenannte Bioherbizide wie beispielsweise Pelargonsäure, Essigsäure, Nelkenöl und Thymianöl, die in verschiedenen Indikationen in einigen Ländern zugelassen sind (Kühne et al., 2005). Die aus *Pelargonium roseum* gewonnene Pelargonsäure führt durch verschiedene Vorgänge zu irreversiblen Zellschäden und den Tod von Pflanzen, wird jedoch schnell abgebaut und ist nur leicht toxisch für im Wasser lebende Tiere (Pernak et al., 2018). Neue auf Pelargonsäure basierende Formulierungen mit Kationen, sogenannte *ionic liquids* wirken trotz niedrigerer Konzentrationen an Pelargonsäure laut Pernak et al. (2018) besser als Pelargonsäure in ihrer Reinform. Bezüglich der mikrobiologisch-ökotoxischen Belastung schneiden Pelargon- und Essigsäure im Vergleich zu einem bioziden Herbizid (Dinitrophenol) gut ab (Malkomes, 2006). Malkomes (2006) stellt jedoch auch fest, dass es durch den relativ hohen Kohlenstoffeintrag (v.a. bei Essigsäure) zu einer biologischen Fixierung von Nitrat kommt, welche den Nitratpool über mehrere Wochen senkt. Cai und Gu (2016) zufolge sind Bioherbizide eine umweltfreundliche, potenziell kostengünstige und nachhaltige Ergänzung zu bewährten Maßnahmen.

Bei der Zerkleinerung des Pflanzengewebes von Brassicaceae werden die darin enthaltenen Glucosinolate freigesetzt (Melander et al., 2005). Diesen werden neben der Wachstums- und Ertragsförderung zahlreicher Spezies über die Förderung der Resistenz gegen abiotischen Stress, die biozide Wirkung gegen Insekten, Nematoden und Pilze auch beikrautregulierende Effekte nachgesagt (Rehman et al., 2018). Die Wirkung dieser biologischen Beikrautunterdrückung variiert je nach Pflanzenart und -sorte und Aufbereitung (Melander et al., 2005). So hat sich bereits herausgestellt, dass beispielsweise Weißer Senf (*Sinapis alba* L.) effektiver wirkt als Brauner Senf (*Brassica juncea* (L.) Czern.) (Melander et al., 2005). Allerdings hat sich die Verwendung von entfetteten Presskuchen wie dem Senfpresskuchen, der als Nebenprodukt bei der Senfgewinnung entsteht, als wirkungsvoller erwiesen als die

Einarbeitung grünen Pflanzenmaterials (Melander et al., 2005). Ein Versuch im Treibhaus ergab eine signifikante Reduktion von Amaranth (*A. retroflexus*) durch Senfpresskuchen, auch Senfschrot genannt, und nur eine leichte Verminderung des Zwiebelertrags (Pannacci et al., 2017). Das lässt auf die Eignung dieses Produkts für die Beikrautregulierung in der ökologischen Zwiebelproduktion schließen (Pannacci et al., 2017). Der unkrautunterdrückende Effekt der in Brassicaceaeen enthaltenden Allelochemikalien wirkt stärker auf zweikeimblättrige als auf einkeimblättrige Beikräuter und beeinflusst kleinsamige Beikräuter stärker als Spezies mit größeren Samen (Shah et al., 2016). Synder et al. (2009) zufolge führte die Düngung von organisch angebauten Karotten mit geschroteten Brassicaceae zu einer effektiven Beikrautregulierung. Diese Kombination aus Düngung und Beikrautregulierung könnte sich eventuell auch auf Zwiebelgemüse übertragen lassen. In einem Glashausversuch reduzierte Senfschrot beim Anbau von Zwiebeln signifikant das Auftreten von Amaranth (*Amaranthus retroflexus* L.), führte allerdings auch zu einem leichten Rückgang des Zwiebelertrags (Boydston et al., 2011). In Anbetracht der großen Einbußen, die Verunkrautung bei Zwiebeln hervorrufen kann, könnte ein leichter Ertragsrückgang allerdings trotzdem verkraftbar sein, wenn die Beikrautregulierung dadurch verbessert wird und der Arbeitsaufwand reduziert wird.

Obwohl die meisten Versuche zur Nutzung allelopathischer Substanzen aus Brassicaceaeen mit Senf oder Raps durchgeführt werden, könnte die weitere Entwicklung von beikrautunterdrückenden Produkten aus Brassicaceaeen ein Potenzial für die Nutzung der bei der Kohlproduktion entstehenden Ernterückstände bieten. Darum handelt es sich auch bei der Arbeit von Quasem und Issa (2018): Ein breit angelegter Versuch sollte das allelopathische und phytotoxische Potenzial von Rückständen verschiedener Gemüsearten, darunter auch Kohl und Karfiol, näher untersuchen. Verschiedene im Gartenbau sehr bedeutende Beikrautarten (*Amaranthus retroflexus*, *Chenopodium murale*, *Eruca sativa*, *Malva sylvestris*, *Portulaca oleracea*, *Solanum nigrum*) wurden bei deren Keimung und Wachstum mit verschiedenen Konzentrationen an wasserlöslichen Extrakten, getrockneter Biomasse und zersetzten Rückständen der Gemüsearten in Kontakt gebracht. Die Ergebnisse variierten je nach eingesetzten Pflanzenrückständen, Beikrautspezies, Konzentrationen und Methode. Ein Beispiel für die vielversprechenden Ergebnisse ist die Keimhemmung von *A. retroflexus* um 25 bis 82%. Die Sprosslänge der Beikräuter konnte im Vergleich mit der Kontrolle um 81 bis 95% und die Wurzellänge um 97 bis 99% minimiert werden. Diese Ergebnisse wurden bei der Keimung auf Filterpapier erreicht. Bei Glashausversuchen mit Erde waren die Prozentzahlen niedriger, aber es kam trotzdem zu einer Reduktion der Keimrate, Spross- und Wurzellänge

verschiedener Beikräuter. Grund für die abgeschwächte Wirkung ist wahrscheinlich die Adsorption der Extrakte an Bodenkolloiden. Ein Teil des Versuchs untersuchte die Wirkung von Boden, in dem zuvor die verschiedenen Gemüsearten gewachsen sind, auf die Beikräuter. In Böden, in denen Karfiol angebaut wurde, sind die Spross- und Wurzellänge sowie die Biomasse von *A. retroflexus* anschließend um etwa die Hälfte reduziert. Außerdem beeinflusst ein vorangehender Anbau von Karfiol genauso wie von Kohl die Keimung und die Höhe von *C. murale* signifikant. Beide Kohlgemüse beeinflussen unter anderem auch verschiedene Parameter des Wachstums von *P. oleracea*. Die Ergebnisse sind ein Indiz dafür, dass sich in den untersuchten Gemüsearten wasserlösliche Phytotoxine befinden, deren Wirkung von der Konzentration der Extrakte abhängig war. Außerdem kam die Studie zu dem Erkenntnis, dass in allen Fällen die Wurzeln stärker betroffen waren als der Spross, was durch den schnelleren und näheren Kontakt zu den Phytotoxinen leicht zu erklären ist. Die bei den Versuchen verwendete Erde wies kein Bodenleben auf, wodurch es auch nicht zu bodenmikrobiologischen Interaktionen kam. Diese könnten die Effekte der Phytotoxine abschwächen oder verstärken. Aus der Studie von Quasem und Issa (2018) kann man schließen, dass Kohlgemüse einen nicht zu unterschätzenden beikrautunterdrückenden Wert für die Folgekultur hat. Auch bisher schon galt Kohl als Gemüse, das unkrautarme Felder hinterlässt. Als Grund dafür hat man größtenteils den guten Reihenschluss und die starke Beschattung des Bodens angenommen. Anscheinend kommen dazu noch die in Kohl enthaltenen Phytotoxine. Dieser beikrautunterdrückende Effekt könnte für konkurrenzarme Gemüsearten von Vorteil sein, welche im Anschluss an Kohl angebaut werden könnten. Die Studie zeigt außerdem, dass verschiedene Beikrautspezies unterschiedlich stark von den verschiedenen Gemüsearten beeinflusst wurden, manche sogar positiv. Bei auftretenden Problembeikräutern sollte also sowohl beim Anbau von Zwiebeln als auch bei Kohl eine geeignete Vorfrucht angebaut werden, die das Problembeikraut negativ beeinflusst. Für den Einsatz glucosinolathaltiger Gründüngungen oder Abbauprodukte zur Beikrautregulierung im Kohlgemüseanbau wurden keine Studien gefunden. Eventuell könnte beispielsweise Senfschrot bei Kohl, der selbst Glucosinolate bildet, zur Zunahme von Kohlschädlingen und Pathogenen führen. Untersuchungen dazu stehen allerdings noch aus. Weitere Nebenprodukte mit beikrautregulierender Wirkung sind Mais-Gluten-Schrot und die bei der Ethanolproduktion anfallenden Getreidereste (Cai und Gu, 2016). Bei einem Versuch mit Mais-Gluten-Schrot in gepflanzten Zwiebeln erwiesen sich die niedrigeren Dosierungen als wenig effektiv, die höchste getestete Dosierung (4000 kg/ha) führte bis 46 Tage nach der Pflanzung der Zwiebeln jedoch insgesamt zu einer Bekämpfungsrate von 72,1% und sogar zu einer Beikrautregulierung von 82,7% der dikotylen Beikräuter (Webber III et al., 2008). Es gilt

aber zu bedenken, dass neben der Dosierung auch andere Parameter, wie Boden- und Witterungsverhältnisse eine wichtige Rolle für die Wirkungsrate spielen. Weitere Beispiele für Extrakte mit beikrautregulierender Wirkung sind die essentiellen Öle aus Eukalyptus (*Eucalyptus* spp.), Lawsons Scheinzypresse (*Chamaecyparis lawsoniana*), Rosmarin (*Rosmarinus officinalis*) und dem Abendländischen Lebensbaum (*Thuja occidentalis*), welche unter anderem Amaranth (*Amaranthus retroflexus*) und Portulak (*Portulaca oleracea*) signifikant unterdrückten (Ramezani et al., 2008). Im Zwiebelanbau hat ein Extrakt aus den oberirdischen Pflanzenteilen des Beifußes (*Artemisia vulgaris* L.) beispielsweise im Voraufverfahren bzw. im Zuge der Saat Potenzial, da dieser nachgewiesenermaßen sowohl hemmend auf Italienisches Raygras (*Lolium Multiflorum*) als auch auf Amaranth (*A. Retroflexus*), nicht jedoch auf Zwiebelsamen wirkt (Pannacci et al., 2015).

Die analysierten biologischen Maßnahmen bieten großes Potenzial zur Entwicklung natürlicher Methoden der Beikrautregulierung und eine relativ große Anzahl wissenschaftlicher Publikationen zu diesem Thema gibt Anlass dazu, mit einer zunehmenden Bedeutung dieses Themas zu rechnen. Doch auch bereits heute lassen sich allelopathische Effekte durch eine breite Fruchtfolge, Mischkultur, Zwischenfrüchte und das Mulchen nutzen. Der Anbau von Zwiebeln, der allgemein nur auf wenig verunkrauteten Feldern und nach konkurrenzfähigen Kulturen empfohlen wird, könnte als Folgekultur beispielsweise nach Kohlgemüse sowohl von einem relativ niedrigen Unkrautpotenzial als auch von allelopathischen Ausscheidungen der Kohlrückstände profitieren.

2.6 Manuelle Beikrautregulierung

Trotz der stetigen technischen Weiterentwicklung geeigneter Beikrautregulierungsgeräte, besteht in vielen empfindlichen und vor allem konkurrenzschwachen Kulturen wie der Zwiebel im biologischen Anbau noch immer hoher Bedarf für manuelles Handjäten (Pannacci et al., 2017). Auch die beiden befragten Betriebe greifen auf mehr oder weniger häufiges Handjäten zurück (siehe Experteninterviews im Anhang). Beim Anbau von Kraut beträgt der Arbeitsaufwand von 1-2 Durchgängen laut Clemens Wurm 50 bis 120 Stunden pro Hektar. Hans-Peter Geher hat beim Sätzwiebelanbau bei zwei bis drei händischen Hackdurchgängen je nach Witterung einen Aufwand von 50-250 Stunden pro Hektar, bei Sommersteckzwiebeln 70 – 100 h/ha (1-2 Durchgänge) und beim Wintersteckzwiebelanbau ebenfalls 70-100 pro Hektar

bei einem einmaligen Handhacken im Frühjahr. Laut Hans-Peter Geher ist die Effektivität des Händischen Hackens sehr hoch.

Bei einem Versuch von Ascard und Fogelberg (2008) stellte sich heraus, dass der Zeitaufwand für die gleiche Zahl an Beikräutern in gepflanzten Zwiebeln niedriger ist als in gesäten Zwiebeln. Jeweils drei unterschiedliche Anbaustrategien für gepflanzte und gesäte Zwiebeln ergaben eine Reduktion des Aufwands für manuelles Jäten um 70 Prozent bei der besten Strategie der gepflanzten Zwiebeln im Vergleich zur besten Strategie in gesäten Zwiebeln (Ascard und Fogelberg, 2008).

Um Ertragsverluste zu vermeiden, müssen Zwiebeln in der sogenannten kritischen Phase unkrautfrei gehalten werden. Üblicherweise ist dafür im Anschluss an Abflammaßnahmen sowie erste mechanische Maßnahmen das manuelle Nachjäten nötig. Bond et al. (1998) zufolge muss 5 bis 7 Wochen nach dem Einsetzen von Zwiebeljungpflanzen manuell gejätet werden, um Ertragsverluste zu vermeiden. Bei gesäten Zwiebeln liegt die Empfehlung für das Handjäten ebenfalls bei 5 Wochen nach dem Auflaufen (Ascard und Fogelberg, 2008).

Die hohe Qualität des Handjäatens bzw. die qualitative Überlegenheit gegenüber Maschinen ist der entscheidende Pluspunkt des Handjäatens. Allerdings stellt das manuelle Jäten aufgrund des hohen Kosten- und Arbeitsaufwands eine wenig effiziente Maßnahme zur Beikrautregulierung dar (Laber, 2009). Die Robustheit wird betriebsintern bestimmt. Potenziell ist das Handjäten weniger abhängig von Witterungs- und Bodenverhältnissen, da keine Gefahr der Bodenverdichtung durch Maschinen besteht. Wenn Arbeitskräfte am Betrieb allerdings knapp sind, kann der hohe Zeitaufwand des Handjäatens die Robustheit stark reduzieren.

3 Schlussfolgerung

Die Analyse der verschiedenen nicht-chemischen Maßnahmen zur Beikrautregulierung in Kohl- und Zwiebelgemüse hat sich als wesentlich komplexer herausgestellt, als ursprünglich erwartet. Da beispielsweise die Effektivität jeder einzelnen Maßnahme von vielen verschiedenen Faktoren, wie beispielsweise den Bodenbedingungen, Klimaverhältnissen, Einsatzzeitpunkt, Geräteeinstellungen und der Sensibilität der Beikrautspezies abhängt, ist ein Vergleich teilweise schwierig oder wenig aussagekräftig. Das in der Wissenschaft normalerweise angewendete Prinzip *Ceteris paribus*, nämlich dass bis auf die zu untersuchende Variable alle anderen Bedingungen unverändert bleiben, konnte beim Vergleich der verschiedener Studien im Zuge dieser Arbeit keineswegs berücksichtigt werden, da die untersuchten Studien an verschiedenen Standorten mit einer Vielzahl verschiedener Versuchsbedingungen (Boden, Klima, Witterung etc.) durchgeführt wurden. Aus diesem Grund wurden einige Versuche detaillierter beschrieben und nur relativ selten direkte Vergleiche verschiedener Studien aufgestellt. Somit bleiben die Versuchsergebnisse in ihrer Individualität bestehen und eine Pauschalisierung der Resultate wurde vermieden. Aus der hohen Abhängigkeit der Effektivität von verschiedenen Faktoren kann auch der Schluss gezogen werden, dass die Effektivität des Beikrautregulierungsmanagements stark beeinflusst werden kann, wenn diese Faktoren entsprechend berücksichtigt werden. Eine genaue Kenntnis beispielsweise der auftretenden Beikräuterpopulation (Zusammensetzung, Dichte etc.), der die Gerätwirkung beeinflussenden Bodenparameter, der Zeitpunkte niedriger Sensibilität der Kulturpflanzen und hoher Sensibilität der Beikräuter sowie der ökonomischen Ertragswirksamkeit der Verunkrautung können die Effektivität einer Beikrautregulierungsmaßnahme entscheidend beeinflussen.

Die Analyse hat gezeigt, dass den passenden Einstellungen verschiedener Geräte eine sehr hohe Wichtigkeit zukommt. Daraus lässt sich folgern, dass die Beikrautregulierung nicht nur durch die Verbesserung oder Neuentwicklung von Geräten, sondern auch durch bessere Schulung und Beratung bezüglich passender Einstellungen optimiert werden kann. Ebenso könnte sich Beratung positiv auf eine optimierte Kombination verschiedener Maßnahmen auswirken. Denn wie verschiedene analysierte Studien gezeigt haben, können einige Maßnahmen in der Kombination mit anderen eine weit höhere Effizienz ergeben. Aus diesem Grund gilt es standortangepasste Strategien zur gezielten Kombination verschiedener indirekter und direkter Maßnahmen zu entwickeln. Des Weiteren bietet zusätzlich zum technischen Fortschritt das Hinterfragen bestehender Anbausysteme Potenzial zur Entwicklung neuer Strategien zur

Regulierung von Beikräutern. Ein Beispiel dafür ist das 90°-versetzte Quer-Hacken, das dank exakter Pflanzung mittels GPS auf passenden Schlägen beispielsweise in Kohlgemüse möglich ist.

Leider hat diese Arbeit nicht zu einer konkreten Lösung beziehungsweise einer direkt für Landwirte umsetzbaren empfehlbaren Beikrautmanagementstrategie geführt. Das war zwar auch nicht Ziel dieser Arbeit, wäre aber nach dieser umfassenden Analyse wünschenswert gewesen. Diese pauschale Empfehlung ist deshalb nicht umsetzbar, da eine kostengünstige und gleichzeitig effiziente sowie bestenfalls auch noch möglichst umweltverträgliche Maßnahmenstrategie je nach Boden- und Niederschlagsverhältnissen, bereits zur Verfügung stehenden Maschinen, Verunkrautung (Art und Menge), Feldaufteilung und vielen weiteren Faktoren sehr unterschiedlich ausfallen kann. Die Erfahrung der beiden befragten Landwirte (siehe Experteninterviews) zeigt allerdings, dass die mechanische Beikrautregulierung mit Hacken und Striegeln als Basis, ergänzt um das händische Hacken, bereits zufriedenstellende Bekämpfungserfolge erbringen kann. Um das aufwendige Handhacken zu minimieren, könnten ergänzend und ohne recht großen Aufwand zusätzlich eine Finger- oder Torsionshacke eingesetzt werden sowie automatisierte Systeme zum Ausbau der Effizienz integriert werden.

Diese Arbeit hat ergeben, dass viele der analysierten Maßnahmen mit zunehmender Effektivität negative Faktoren in Kauf nehmen müssen, seien es Pflanzenbeschädigungen, Bodenverdichtungen, Ertrags- oder Qualitätsreduktionen oder ein erhöhter Ressourcenaufwand. Nichtsdestotrotz sind mit der Entscheidung für nicht-chemische Beikrautregulierung im Zwiebel- und Kohlgemüseanbau viele positive Aspekte verbunden:

- Die zunehmende Nachfrage nach pestizidfreien Produkten
- Das Vermeiden potenzieller Gefahren durch Herbizide für Anwender und Umwelt
- Die positiven Nebenwirkungen beispielsweise der mechanischen oder indirekten Maßnahmen für Boden und Pflanzen (Stickstoffmobilisierung, Förderung der Bodenstruktur etc.)
- Vermeidung der Gefahr von Herbizidresistenzen
- Reduktion der Abhängigkeit von Externen (Pflanzenschutzmittelindustrie)

Diese Aspekte lassen darauf hoffen, dass zum einen nicht-chemische Maßnahmen, aber auch systemische Ansätze zu nicht-chemischen Anbausystemen von Politik und Forschung zukünftig forciert werden. Weitere Fortschritte in diesem Bereich könnten den Zeit-, Kosten-

und Arbeitsaufwand der nicht-chemischen Beikrautregulierung vor allem in wenig konkurrenzfähigen Kulturen wie Zwiebelgemüse reduzieren sowie das kostenintensive Handjäten zukünftig überflüssig zu machen. Davon würden die Gesellschaft, die Umwelt und die Biolandwirtschaft profitieren. Denn wenn erstmal funktionierende nicht-chemische Maßnahmen zur Beikrautregulierung zur Verfügung stehen, ist ein bedeutendes Hemmnis vieler Landwirte, auf biologische Art und Weise zu produzieren, überwunden.

4 Literaturverzeichnis

- Agrarmarkt Austria (2017): Jahresbericht Obst und Gemüse für das Jahr 2016. <https://www.ama.at/getattachment/5df93beb-1175-46de-9de9-62fd6a510cff/Jahresbericht-Obst-und-Gemuse-2016.pdf> (Online abgerufen am 11.10.18)
- Ascard, J. und Fogelberg, F. (2008): Mechanical in-row weed control in transplanted and direct-sown bulb onions. *Biol. Agric. Hortic.* 25, 235-251.
- Adamczewska-Sowinska, K., Kolota, E., Winiarska, S. (2009): Living mulches in field cultivation of vegetables. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 70, 19-29.
- Ball, B. C. (2006): Mechanical weeding effects on soil structure under organic vegetables. Joint Organic Congress, Odense, May 30-31.
- Baumann, D. T., Kropff, M.J. und Bastiaans, L. (2000): Intercropping leeks to suppress weeds. *Weed Res.* 40, 359-374.
- Berndl, C. (2016): Precision&Smart Farming - Mit GPS, Kamera und Ultraschallsensoren. <https://noe.lko.at/precision-smart-farming-mit-gps-kamera-und-ultraschallsensoren+2500+2466368> (Abgerufen am 25.04.2019)
- Bleeker, P., van der Schans, D. und van der Weide, R. (2007): New ways of sowing or planting onions for innovative intra-row weeders. In: *Proceedings 7th Workshop of the EWRS Working Group: Physical and Cultural Weed Control*, Salem, 103-104.
- Bohne, B. (2011): Abflammtchnik: Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 90-94.
- Bolten, W. und Wilhelm, B. (2011): Auf dem Weg zur Präzisionshacke – Beikrautregulierung mit der Scharhacke in Gemüsekulturen. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft.
- Bond, W., Burston, S., Bevan, J.R. und Lennartsson, M.E.K. (1998): Optimum weed removal timing in drilled salad onions and transplanted bulb onions grown in organic and conventional systems. *Biological Agriculture & Horticulture*, 16, 191-201.
- Boydston, R.A., Morra, M.J., Borek, V., Clayton, L., Vaughn, S.F. (2011): Onion and weed response to mustard (*Sinapis alba*) seed meal. *Weed Sci.* 2011, 59, 546-552.
- Boyhan, G.E., Hicks, R., Randell Hill, C. (2006): Natural Mulches are not very effective for weed control in onions. *HortTechnology* 16(3), 523-526.
- Brainard, D. C. und Bellinder, R.R. (2004): Weed suppression in a broccoli-winter rye intercropping system. *Weed Science* 52, 281-290.
- Brainard, D.C., Peachy, R.E., Haramoto, E.R., Luna, J.M., Rangarajan, A. (2013): Weed ecology and nonchemical management under strip tillage: Implications for northern U.S. vegetable cropping systems. *Weed Sci.* 27, 218-230.
- Braun, A. (2011): Die Unkrautkur – ein wesentliches Element in der Beikrautregulierung im Gemüsebau. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 77-82.
- Braun, A. (2011): Die Torsionshacke - ein Gerät zur Beikrautregulierung in der Reihe. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 133-138.
- Brown, B. und Gallandt, E. (2018): A Systems Comparison of Contrasting Organic Weed Management Strategies. *Weed Science*, 66 (1), 109-120.

- Buchanan, A. L., Kolb, L.N., Hooks, C.R.R. (2016): Can winter cover crops influence weed density and diversity in a reduced tillage vegetable system?. *Crop Protection* 90, 9-16.
- Cai, X. und Gu, M. (2016): Bioherbicides in Organic Horticulture. *Horticulturae* 2018, 2,3.
- Campiglia, E., Temperini, O., Mancinelli, R., Saccardo, F. (2000): Effects of soil solarization on the weed control of vegetable crops and on the cauliflower and fennel production in the open field. *ISHA Acta Hort.* 533, 249-255.
- Carr, P.M., Gramig, G.G., Liebig, M.A. (2013): Impacts of Organic Zero Tillage Systems on Crops, Weeds, and Soil Quality Sustainability 5, 3172-3201.
- Ciaccia, C., Testani, E., Campanelli, G., Sestili, S., Leteo, F., Tittarelli, F., Riva, F., Canali, S., Trinchera, A. (2015): Ecological service providing crops effect on melon-weed competition and allelopathic interactions. *Organic Agriculture*, 5(3), 199–207.
- Davies, G. und Lennartsson, M. (2008): *Organic Vegetable Production – A complete Guide*. Ramsbury: Crowood.
- Dierauer, H. und Stöppler-Zimmer, H. (1994): *Unkrautregulierung ohne Chemie*. Stuttgart: Ulmer.
- Dillard, H., Bellinder, R. und Shah, D. (2003): Integrated management of weeds and diseases in a cabbage cropping system. *Crop protection* 23, 163-168.
- Dimson, E.V. (2001): Cauliflower production in Arizona. Available at: <http://cals.arizona.edu/crop/public/docs/azcauliflower.pdf>. (Abgerufen am 03.03.2019).
- Douds Jr., D.D., Lee, J., McKeever, L., Duffield, R., Ziegler-Ulsh, C. und Moyer, J. (2018): Stale seedbed technique for weed control negatively impacts the indigenous AM fungal population, *Biological Agriculture & Horticulture*, 34(3), 199-210.
- Ebrahimi, E., Bagheri, A. und Nurbakhsh, F. (2016): Evaluation of yield and yield components of leek (*Allium porrum* L.) in intercropping with white clover (*Trifolium repens* L.). *Majallah-i Ulum-i Bāghbānī*, 29 (3), 435 - 442.
- Fibl (2012): *Mechanische Unkrautregulierung im Gemüsebau (Film)*. <https://www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/gemuesebau/unkraut-gemuese/unkrautregulierung-gemuese-film.html> (Online abgerufen am 04.11.18).
- Finney, D. M., Creamer, N.G., Schultheis, J.R., Wagger, M.G. und Brownie, C. (2009): Sorghum sudangrass as a summer cover and hay crop for organic fall cabbage production. *Renewable Agriculture and Food Systems* 24 (03), 225 – 233.
- v. Fragstein und Niemsdorff, P. (2014): Förderung multifunktionaler Vorteile von Untersaat-Gemüse-Mischanbau. *Tagungsband 49. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung Dresden*, 30 (2014), 55.
- Fogelberg, Fredrik (2007): Reduction of manual weeding labour in vegetable crops – what can we expect from torsion weeding and weed harrowing? In: *Proceedings 7th Workshop of the EWRS Working Group: Physical and Cultural Weed Control*, Salem, 113-116.
- Gaus, C.-C., Minßen, T.-F., Urso, L.-M., de Witte, T., Wegener, J. (2017): *Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, D-Braunschweig; Technische Universität Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, D-Braunschweig; Julius Kühn-Institut.
- Griepentrog, H., Nørremark, M. and Nielsen, J. (2006): Autonomous intra-row rotor weeding based on GPS. *CIGR World Congress 2006 - Agricultural Engineering for a Better World*, 7 Seiten.
- Griepentrog, H.W. und Dedousis, A.P. (2010): Mechanical weed control. In: *Soil Engineering*. Hrsg.: Dedousis, A.P. und Bartzanas, T., Vol. 20, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 171-180.
- Haberland, R., Koch, W. (2007): Bestandesführung in Ökorüben. *Neue Landwirtschaft* 3, 40 – 42.

- Hansson, D. und Svensson, S.-E. (2007): Steaming soil in narrow bands to control weeds in row crops. In: Proceedings 7th Workshop of the EWRS Working Group: Physical and Cultural Weed Control, Salem, 137.
- Heilmann und Zimmer (1990): Ökologischer Feldgemüsebau: Beiträge aus Praxis, Wissenschaft und Beratung. Karlsruhe: Müller.
- Heisel, T., Andreasen, C. und Christensen, S. (2002): Sugar beet yield response to competition from *Sinapis arvensis* or *Lolium perenne* growing at three different distances from the beet and removed at various times during early growth. *Weed Research* 42, 406–413.
- Heuberger, H. (2015): Status-Quo-Analyse zur Unkrautregulierung im ökologischen Arznei- und Gewürzpflanzenanbau in Bayern, Abschlussbericht. Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern, 144 Seiten.
- Hussain, Z., Ilyas, M., Luqman, Khan, I.A., Ullah, I. und Ullah, K. (2017): Plant spacing and mulching effect on onion yield and weeds. *Pak. J. Weed Sci. Res.*, 23(1), 65-77.
- Irmaileh, B. und Rayyan, A. (2008): Pre-plant composting of organic matter helps weed control in organically grown vegetable. 5th International weed science congress, Vancouver.
- Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V. und Chauhan, B.S. (2015): Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection* 72, 57-65.
- Jüttersonke, B. (2000): Alternative Verfahren zur Unkrautbekämpfung. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 47-56.
- Köpke, U. (2000): Konzept der Unkrautregulierung im ökologischen Landbau. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 57-70.
- Koller, M., Lichtenhahn, M. und Six, Roswitha (2007): Biologischer Anbau von Zwiebeln. *Bio Austria, Fibl, Bioland, LÖN* (Hrsg.).
- Koller, M. (2011): Optimierte Beikrautregulierung im Zwiebelanbau. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 113-118.
- Koller, M. und Total, R. (2011): Erfahrungsbericht: Beetstriegel. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 109-112.
- Kress, W. (1990): Mechanische und thermische Beikrautregulierung. In: *Ökologischer Feldgemüsebau: Beiträge aus Praxis, Wissenschaft und Beratung*. Heilmann, H. und Zimmer, U. (Hrsg.). Karlsruhe: Müller.
- Krug, H., Liebig, H.-P., Stützel, H. (2002): *Gemüseproduktion*. Stuttgart: Ulmer.
- Kruidhof, H. und Bastiaans, L. (2007): Weed suppression by cover crop residue material; exploration and optimization. In: Proceedings 7th Workshop of the EWRS Working Group: Physical and Cultural Weed Control, Salem, 85.
- Kühne, S., Verschwele, A., v.Hörsten, D. und Jahn, M. (2005): Implementation of bioherbicides and seed treatment in organic farming. In: U. Köpke et al. (Hrsg.): *Researching Sustainable Systems. Proc. 1st Sci Conf. International Society of Organic Agriculture research (ISO FAR) 21-23 September 2005, Adelaide*, 150- 153.
- Laber, H. (1999): Effizienz mechanischer Unkrautregulierungsmaßnahmen im Freilandgemüsebau. Dissertation Universität Hannover.
- Laber, H. und Stützel, H. (2003): Ertragswirksamkeit der Restverunkrautung in Gemüse kulturen nach nichtchemischen Unkrautregulationsmaßnahmen. In: *Pflanzenbauwissenschaften*, 7 (1), S. 29–38.
- Laber, H. (2009): Unkrautmanagement. In: *Ökologischer Gemüsebau, Handbuch für Beratung und Praxis (2.Aufl.)*. George, E. und Eghbal, R. (Hrsg.). Mainz: Bioland.
- Laserbasierte Unkrautregulierung (2019) <https://www.pfluglos.de/nachrichten/laserbasierte-unkrautbekaempfung> (Abgerufen am 20.02.2019).

- Lennartsson, E.K.M., Stanley, J.P., James, J.D. und Willis, C.D. (1990): The use of light exclusion techniques for clearing grass pasture in organic horticultural systems. In: 3. internationale Konferenz zu Aspekten der nicht-chemischen Beikrautregulierung. Bundesanstalt für Agrarbiologie, 135-145.
- Lešnik, M., Iršič, T. und Vajs, S. (2018): The impact of growing onions under straw mulch on the control of weeds. 18. European Weed Research Society Symposium, Ljubljana, Book of Abstracts, 118.
- Lichtenhahn, M., Koller, M., Dierauer, H. und Baumann, D. (2005): Weed control in Organic Vegetable Cultivation. Research Institute of organic agriculture (FiBL).
- Liebman, M., Mohler, C. und Staver, C. (2001): Ecological Management of Agricultural Weeds. Cambridge University Press.
- Malkomes, H.-P. (2006): Mikrobiologisch-Ökotoxikologische Bodenuntersuchungen von zwei zur Unkrautbekämpfung mit hohen Dosierungen eingesetzten Fettsäure-Herbiziden. Umweltchem Ökotex 18 (1) 13 – 20.
- Marold, R. (2000): Probleme der Unkrautbekämpfung im ökologischen Landbau aus der Sicht der Praxis. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 10-13.
- Massucati, L.F.P., Windisch, E., Täufer, F. und Köpke, U. (2009): Kontrolle von Rumex spp. mit Citronella-Öl im organischen Landbau. In: Mayer, J. et al. (Hrsg.): Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, ETH Zürich, 280-283.
- Melander, B., Rasmussen, I.A. und Barberi, P. (2005): Integrating physical and cultural methods of weed control – examples from European research. Weed Science 53, 369–381.
- Melander, B. (2014): Physical and cultural weed control – Status and future directions. XXIX Brazilian Weed Science Conference, 1-4 September 2014, Gramado, Brazil.
- Melander, B., Lattanzi, B. und Pannacci, E. (2015): Intelligent versus non-intelligent mechanical intra-row weed control in transplanted onion and cabbage. Crop Protection 72 (2015), 1-8.
- Montemurro, F., Diacono, M., Ciaccia, C., Campanelli, G., Tittarelli, F., Leteo, F., Canali, S. (2016): Effectiveness of living mulch strategies for winter organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) production in Central and Southern Italy. Renewable Agriculture and Food Systems: 32(3); 263–272.
- Niemann, P. (2000): Sortenwahl - Ein Element zur Unkrautunterdrückung. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 27-34.
- Niggli, U. und Dierauer, H. (2000): Unkrautbekämpfung im ökologischen Landbau in der Schweiz. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 17-26.
- Ökolandbau, 2014. Unkrautregulierung im ökologischen Gemüsebau.
<https://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/spezieller-pflanzenbau/gemuese/pflanzenschutz-und-unkrautregulierung/unkrautregulierung/> (Abgerufen am 24.04.2019)
- Ökolandbau, 2017. Untersaaten: Möglichkeiten, Grenzen, Mischungen.
<https://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/spezieller-pflanzenbau/zwischenfruechte/untersaaten/> (Abgerufen am 27.09.2018)
- Oerke, E.C., Dehne, H.W. (2004): Safeguarding production-losses in major crops and the role of crop protection. Crop Prot. 23, 275–285.
- Orzolek, M., Murphy, J. und L. Otjen (1996): Nonchemical weed control in cabbage. In: Hortscience, 31 (4), 577.
- Pallutt, B. (2000): Unkrautunterdrückung und -bekämpfung durch Fruchtfolgegestaltung, Bodenbearbeitung, Aussaatzeit, Saatmenge und Stickstoffversorgung. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 35-46.
- Plagge, J. (2000): Probleme der Unkrautbekämpfung im ökologischen Gartenbau aus der Sicht der Praxis. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Heft 72, 14-16.

- Pannacci, E., Guiducci, M., Tei, F., (2007): Mechanical weed control in organic onion seed production. In: Proceedings 7th Workshop of the EWRS Working Group: Physical and Cultural Weed Control, Salem, 119-120.
- Pannacci, E., Pettorossi, D., Regni, L., Tei, F. (2015): Allelopathic potential of mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) to control the Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in winter wheat. *Allelopathy J.* 36 (2), 257-272.
- Pannacci, E., Lattanzi, B. und Tei, F. (2017): Non-chemical weed management strategies in minor crops: A review. *Crop Protection* 96, 44-58.
- Pérez-Ruiz, M., Slaughter, D.C., Gliever, C.J., Upadhyaya, S.K. (2012): Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops. *Computer and Electronics in agriculture* 80, 41-49.
- Pernak, J., Czerniak, K., Niemczak, M., Lawniczak, L., Kaczmarek, D.K., Borkowski, A. und Praczy, T. (2018): Bioherbicide ionic liquids. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, 2741-2750.
- Puffert, M. (2011): Maßnahmen in Beetkulturen und Feldgemüsebau. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft.
- Quasem, J.R. (2009): Weed competition in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) in the Jordan Valley. *Scientia Horticulturae* 121 (2009) 255–259.
- Qasem, J.R. und Issa, N.N. (2018): Germination and growth management of some common annual weeds by phytotoxicity of selected vegetable crops. *Scientia Horticulturae* 233, 431–445.
- Radhakrishnan, R., Alqarawi, A., Abd_Allah, E. (2018): Bioherbicides: Current knowledge on weed control mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 158, 131-138.
- Ramezani, S., Saharkhiz, M.J., Ramezani, F., Fotokian, M.H (2008): Use of essential oils as bioherbicides. *Jeobp* 11, 319–327.
- Rehman, S., Shahzad, B., Bajwa, A. A., Hussain, S., Rehman, A., Cheema, S.A., Abbas, T., Ali, A., Shah, L., Atkins, S., Li, P. (2018): Utilizing the Allelopathic Potential of Brassica Species for Sustainable Crop Production: A Review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-14.
- Reid, N.T.P. und Cohen, J. (2013): Alternative weed management strategies for vegetables: solarization and mulching in onions. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, 49, 391-397.
- Robačar, M., Canali, S., Lakkenborg Kristensen, H., Bavec, F., Grobelnik Mlakar, S., Jakop, M., Bavec, M. (2016): Cover crops in organic field vegetable production. *Scientia Horticulturae* 208 (2016) 104–110.
- Tei, F., Pannacci, E., Cirujeda, A., Dobrzanski, A., Froud-Williams, R. J., Rocha, F., Ruuttunen, P., Sanseovic, T., Simoncic, A., Torma, M., van der Weide, R., Verschwele, A., Zaragoza, C. und Neuweiler, R. (2005): Weeds and weed management in cabbages - a review. : *Proceedings 13th EWRS Symposium*, 20-23 June 2005, Bari, Italy.
- Tei, F. und Pannacci, E. (2008): Integrated weed management systems in vegetables: current Status and perspectives. 5th International weed science congress, Vancouver.
- Tillett, N.D., Hague, T., Grundy, A.C. und Dedousis, A.P. (2008): Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, 99, 171 – 178.
- Total, R. (2003): Abflammen im Lauchanbau: Unkrautbekämpfung in der Reihe. *Der Gemüsebau* 8/2003, S 16.
- Schwarz, H.-P. und Hege, Daniel (2014): GPS-based weed control in field vegetable growing. *Landtechnik* 69 (2), 68–71.
- Saha, B., Devi, C. Khwairakpam, M., Kalamdhad, A.S. (2018): Vermicomposting and anaerobic digestion viable alternative options for terrestrial weed management - A review. *Biotechnology Reports* 17, 70-76.
- Sauermann, G. (2011): Vor- und Nachteile eines Ölabflammgerätes. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 103-108.

- Shah, A. N., Iqbal, J., Ullah, A., Yang, G., Yousaf, M., Fahad, S., Tanveer, M., Hassan, W., Tung, A. T., Wang, L., Khan, A., Wu, Y. (2016): Allelopathic potential of oil seed crops in production of crops: a review. *Environ Sci Pollut Res* 23,14854–14867.
- Sivesind, E.C., Leblanc, M.L., Cloutier, D.C., Seguin, P., Stewart, K.A. (2012): Impact of selective flame weeding on onion yield, pungency, flavonoid concentration, and weeds. *Crop Protection* 39, 45-51.
- Snyder, A., Morra, M.J., Johnson-Maynard, J., Thill, D.C. (2009): Seed meals from brassicaceae oilseed crops as soil amendments: Influence on carrot growth, microbial biomass nitrogen, and nitrogen mineralization. *HortScience* 2009, 44, 354–361.
- Staub, S. (2018): Präzise und effizient – Mechanische Unkrautregulierung. *Gemüse* 6 (2018), 46-48.
- Utstumo, T., Urdal, F., Brevik, A., Døruma, J., Netland, J., Overskeida, Ø., Berge, Gravidahl, J.T. (2018): Robotic in-row weed control in vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 36-45.
- van der Weide, R.Y., Bleeker, P.O., Machten, V.T.J.M., Plotz, L.A., Fogelberg, F. und Melander, B. (2007): Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Research* 48, 215–224.
- Verschwele, Arnd (2007): Phytotoxische Wirkungen pflanzlicher Öle auf Keimung und Wachstum von Unkräutern. In: *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft*. 55. Deutsche Pflanzenschutztagung in Göttingen 25. - 28. September 2006, S. 245-246.
- Verschwele, A. (2017): Ausreisen, abschneiden, verschütten. *DLZ Agrarmagazin*, 68 (3), 2-5.
- Walter, S. (1995): *Nicht-chemische Unkrautregulierung* (2. Aufl.). Bad Dürkheim: SÖL.
- Webber III, C.L., Shrefler, J.W. und Taylor, M.J. (2008) Corn Gluten Meal as an alternative weed control option for spring-transplanted onions. *International Journal of Vegetable Science*, 13/3, 17-33.
- Wszelak, A.L., Doohana, D.J., Athanasios, A. (2007): Weed control and crop quality in cabbage (*Brassica oleracea* (capitata group)) and tomato (*Lycopersicon lycopersicum*) using a propane flamer. *Crop Protection* 26, 134–144.
- Zillger, C. und Tschöpe, B. (2006): *Mechanische Unkrautbekämpfung im Ökologischen Landbau*. Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, Abt. Landwirtschaft: Kompetenzzentrum ökologischer Landbau (Hrsg.).
- Zillger, C., Dehe, M., Postweiler, K. und Tschöpe, B. (2011): Verschiedene Hackgeräte im Feldversuch: Fenchel, Soja und Gemüsekulturen. Wilhelm, B. und Hensel, O. (Hrsg.): *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau*, Witzenhausen, Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft, 119-126.
- Zwenger, P. und Ammon, H. (2002): *Unkraut – Ökologie und Bekämpfung*. Stuttgart: Ulmer.

5 Anhang

5.1 Gedächtnisprotokoll der Expertenbefragung – Thema: Nicht-chemische Beikrautregulierungsmaßnahmen im Zwiebelanbau

Datum: 9.01.19

Name: Hans-Peter Geher

Standort: Schönfeld und Lasse (Marchfeld)

Vorherrschende Bodenart: sandig-schottrig (Schönfeld), sandiger Lehm bzw. lehmiger Sand (Lasse)

Klima / Niederschlag: Pannonisches Klima, etwa 600 mm Jahresniederschlag

1. Auf wieviel Hektar Zwiebeln bauen Sie an?

2018: 22 ha

1. Welches Anbauverfahren?

Säzwiebeln sowie Winter- und Sommersteckzwiebeln; Es wird großflächig mit Schlagberegnung bewässert.

2. Über wie viele Jahre erstreckt sich Ihre Erfahrung mit dem Anbau von Zwiebeln?

Auf 15 Jahre ohne chemische Beikrautregulierungsmaßnahmen, vorher konventioneller Anbau von Zwiebeln.

3. Verwenden Sie chemische Beikrautregulierungsmittel / Herbizide? Nein

4. Welche Maßnahmen führen Sie zur Regulierung von Beikräutern durch?

Direkte Maßnahmen: Hacken, teilweise in Kombination mit Heckstriegel, Rollstriegel, händisches Hacken

Indirekte Maßnahmen: Anbaupause von 4 Jahren, im Jahr zuvor wird Getreide angebaut, im Herbst folgt eine Begrünung und anschließend wird gepflügt.

5. Gründe für die Wahl dieser Maßnahmen?

Keine bestimmten Gründe. Zu Beginn wurde nur gehackt und aufgrund guter Erfahrungen beim Ausprobieren eines Striegels wird seitdem auch gestriegelt. Thermische Beikrautregulierung mit dem Abflamngerät wurde mit Säzwiebeln im frühen Peitschenstadium (etwa 1,5 cm hoch) ausprobiert, aber eventuell wurde der Zeitpunkt zu spät gewählt. Mit dem Abflammen von Steckzwiebeln bei einer Wuchshöhe von etwa 15 cm wurden bei einem Versuch bisher gute Erfahrungen gemacht.

6. Wann und wie oft werden diese Maßnahmen durchgeführt? Wieviel Arbeitszeit ist mit diesen Maßnahmen verbunden?

Säzwiebeln: 12-reihig mit 45 cm Reihenabstand; 6 m Arbeitsbreite;

3-4 Durchläufe mit maschineller Hacke, das erste Mal bei einer Wuchshöhe von 2-3 cm und

anschließend in Abständen von ungefähr 2-3 Wochen bis zum Reihenschluss; 1-3 ha/ h →
Arbeitszeit im Durchschnitt: 5 h / ha

Mindestens zwei, eher drei händische Hackdurchgänge, 50-250 h / ha je nach Witterung

Sommersteckzwiebeln: 6-reihig mit 45 cm Reihenabstand; 3 m Arbeitsbreite;

1-2 Mal Hacken, kombiniert mit Heckstriegel; Arbeitszeit im Durchschnitt: 5 h / ha

Ein Durchgang mit händischer Hacke, nach Bedarf ein zweiter Durchgang; Arbeitszeit: 70 –
100 h / ha

Wintersteckzwiebel: 6-reihig mit 45 cm Reihenabstand; 3 m Arbeitsbreite;

Wenn die Witterung passt, wird im Herbst einmal gestriegelt, im Frühjahr 2-3

Hackdurchgänge, der erste kombiniert mit Striegel;

Händische Hacke: Einmal im Frühjahr, 70-100 h / ha

Rollstriegel: Je nach Bodenverhältnissen und Witterung 0-2 Durchgänge, erstes Mal bei einer
Wuchshöhe von 3-4 cm. Pro Durchgang ca. 0,5 Stunden pro ha Arbeitszeitaufwand.

7. Wie zuverlässig sind die Maßnahmen in Bezug auf Witterung?

Wenn es witterungsbedingte Probleme bei der Beikrautregulierung gibt, dann aufgrund von
zu viel Niederschlag. Die Hacke ist robuster, der Striegel ist bezüglich der Witterung sensibler,
da der ideale Zeitpunkt zum Striegeln auch wenig flexibel ist (Größe der Beikräuter von hoher
Bedeutung).

8. Wie hoch ist der Bekämpfungserfolg / die Effektivität?

Hacken: sehr hoch

Striegeln: mittelmäßig, da sehr zeitabhängig (Größe der Beikräuter, Witterung)

Händisch Hacken: sehr hoch

9. Wie hoch ist die Qualität (Schädigung der Pflanzen etc.)?

Zum richtigen Zeitpunkt haben sie Maßnahmen eine hohe Qualität. Ab dem Moment, wo es
zur Beschädigung von Pflanzen kommt, werden die Maßnahmen nicht mehr durchgeführt.

10. Wie hoch schätzen Sie die Verunkrautung zur Zeit des Erntetermins ein?

Sehr unterschiedlich, zwischen 10 und 80 Prozent.

11. Ist die Spätverunkrautung im Ertrag spürbar?

Bei einer starken Verunkrautung, die nicht erst kurz vor der Ernte eintritt, kann es zu
Ertragseinbußen von etwa 20 Prozent kommen.

12. Benutzen Sie eine automatische Reihensteuerung (GPS, RTK etc.)?

Wir verwenden bis jetzt keine automatische Reihensteuerung.

5.2 Gedächtnisprotokoll der Expertenbefragung – Thema: Nicht-chemische Beikrautregulierungsmaßnahmen im Krautanbau

Datum: 8.01.19

Name: Clemens Wurm

Standort: Oftering (OÖ)

Vorherrschende Bodenart: Lehmboden, mittelschwer

Klima / Niederschlag: langjähriger Durchschnitt von etwa 750 mm

1. Auf wieviel Hektar bauen Sie Kraut an?
6 ha (Frühkraut, Lagerkraut weiß und rot, Flachkraut, Spitzkraut, Industriekraut weiß)
2. Welches Anbauverfahren?
Jungpflanzen werden halbautomatisch 4-reihig gesetzt; Beikrautregulierung wird ohne Reihensteuerung (GPS etc.) durchgeführt.
3. Seit wann bauen Sie Kraut an? seit 2004
4. Verwenden Sie chemische Beikrautregulierungsmittel / Herbizide? Nein
5. Welche Maßnahmen führen Sie zur Regulierung von Beikräutern durch?
Direkte Maßnahmen: Striegeln und Hacken im gemeinsamen Durchlauf (Fronthacke und Heckstriegel)
Indirekte Maßnahmen: Vorfruchtanbau von Klee gras über mindestens 1,5 und bestenfalls 2,5 Jahre, um Beikrautdruck niedrig zu halten.
6. Gründe für die Wahl dieser Maßnahmen?
Keine bestimmten Gründe, Striegeln und Hacken sind Standard.
7. Wann und wie oft werden diese Maßnahmen durchgeführt?
Insgesamt etwa vier Mal, der erste Durchgang findet etwa zwei Wochen nach dem Pflanztermin statt.
8. Wieviel Arbeitszeit ist mit diesen Maßnahmen verbunden?
Der Arbeitsaufwand beträgt etwa 8 Stunden pro Hektar.
9. Wie zuverlässig sind die Maßnahmen in Bezug auf Witterung?
Nasse Jahre sind prinzipiell problematischer als trockene. Sehr trockene Jahre sind für das Striegeln allerdings auch problematisch, denn die Kulturpflanzen müssen Wurzeln ausgebildet haben, um Striegeln zu können. Es gab bisher jedoch noch nicht den Fall, dass die

Witterung die Beikrautregulierung so stark beeinträchtigt hätte, dass sie nicht rechtzeitig durchgeführt hätte werden können.

10. Wie hoch ist der Bekämpfungserfolg / die Effektivität?

Im besten Fall werden 98% der Beikräuter, im schlechtesten Fall 85 % bekämpft.

11. Wie hoch ist die Qualität (Schädigung der Pflanzen etc.)?

Durch das Hacken kommt es überhaupt nicht zu Pflanzenschädigungen, außer bei Hackfehlern, also falschen Einstellungen oder ungenauer Fahrweise etc. Das Striegeln kann das Kraut beschädigen, wenn beispielsweise die Pflanze zu groß ist, wenn zu tief oder mit zu viel Druck gestriegelt wird.

12. Wie hoch schätzen Sie den Verlust an Pflanzen ein, der durch das Striegeln entsteht?

Der Verlust sollte nicht größer als 2-3% sein, ist der Verlust höher müssen Änderungen an der Einstellung des Striegels erfolgen.

13. Wie hoch schätzen Sie die Verunkrautung zur Zeit des Erntetermins ein?

Bis auf Einzelpflanzen sollte der Acker auch bei der Ernte unkrautfrei sein, Unkräuter die aufgrund der langen Kulturdauer später aufkommen, keine Samen bilden und unter der Kulturpflanze stehen sind natürlich vorhanden, stellen allerdings kein Problem dar, da sie der Hauptkultur keine Konkurrenz machen. Zur maschinellen Hacke werden auch noch 1-2 Hackgänge händisch durchgeführt, im Ausmaß 50-120 Stunden. (Anm.: pro Hektar)

6 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass ich diese Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet habe. Die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde an keiner anderen Stelle als Prüfungsleistung eingereicht.

Luxemburg, den 29.07.19

Theresa Babucke