



## **Ressourcenschonender, nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter (2017–2021)**

**Abschlussbericht**

### **Autorinnen und Autoren**

Martina Keller, Pascal Haberey, Daniela Hodel, René Total, Katja Heitkämper, Esther Bravin, Saskia Glück, Lutz Collet, Stefan Wyss, René Steiner, Hans Möri, Thomas Wyssa, Thomas Anken, Fanny Duckert, Rolf Matter

## Projektpartner

- Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau, (SZG, Projekt-Mitinitiantin und Projektleitung), Koppigen, vertreten durch Rolf Matter
- Verband Schweizer Gemüseproduzenten (VSGP, Projekt-Mitinitiant und interner Auftraggeber), Bern, vertreten durch Fanny Duckert
- Forum Forschung Gemüse (FFG, Projekt-Mitinitiant), Koppigen, vertreten durch René Steiner
- Agroscope, Wädenswil, vertreten durch Reto Neuweiler, Pascal Haberey, René Total, Esther Bravin und Martina Keller
- Agroscope, Tänikon, vertreten durch Thomas Anken und Katja Heitkämper
- Inforama Seeland (Inforama), Ins, vertreten durch Stefan Wyss
- Landwirtschaftliches Institut, Grangeneuve (IAG), vertreten durch Lutz Collet
- Wyssa Gemüse (Wyssa), Galmiz, vertreten durch Thomas Wyssa
- Möri Kartoffel- und Gemüsebautechnik (Möri), Spins/Aarberg, vertreten durch Hans Möri
- Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL, wissenschaftliches Mitglied Begleitgruppe, nicht Vertragspartner), Frick, vertreten durch Samuel Hauenstein

## Impressum

Herausgeber	Agroscope Tänikon 1 8356 Ettenhausen www.agroscope.ch
Auskünfte	Martina Keller, <a href="mailto:martina.keller@agroscope.admin.ch">martina.keller@agroscope.admin.ch</a> Katja Heitkämper, <a href="mailto:katja.heitkaemper@agroscope.admin.ch">katja.heitkaemper@agroscope.admin.ch</a>
Übersetzung	Sprachdienst Agroscope
Gestaltung	Petra Asare
Titelbild	René Total
Copyright	© Agroscope 2023
Download	www.agroscope.ch/science
ISSN	2296-729X
DOI	<a href="https://doi.org/10.34776/as151g">https://doi.org/10.34776/as151g</a>

### Haftungsausschluss :

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>6</b>
<b>Summary</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Projektziele</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Einleitung und Problemstellung</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Neuer Pflanzenschutzroboter</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Projektverlauf</b> .....	<b>12</b>
<b>5 Einsparpotential und biologische Wirksamkeit</b> .....	<b>17</b>
5.1 Ausgangslage .....	17
5.2 Ziele der Studie .....	18
5.3 Material und Methoden .....	18
5.3.1 Design der Feldversuche .....	18
5.3.2 Brühmenge/ha .....	18
5.3.3 Bestimmung der Wirksamkeit .....	18
5.4 Ergebnisse .....	19
5.4.1 Pflanzenschutzmittel-Einsparungen .....	19
5.4.2 Wirksamkeit gegen Blattläuse .....	21
5.4.3 Wirksamkeit gegen Erdflöhe .....	21
5.5 Ausblick .....	22
<b>6 Testfahrten und Praxiserfahrungen</b> .....	<b>23</b>
6.1 Testfahrten in gepflanzten Bundzwiebeln (2019) .....	23
6.2 Testfahrten in gepflanzter Petersilie (2019) .....	23
6.3 Testfahrten in Sellerie (2020) .....	24
6.4 Grenzen der Sensoren und Aktoren .....	25
6.5 Off-target .....	25
<b>7 Dosierschema</b> .....	<b>27</b>
7.1 Entwicklung eines Dosierschemas .....	27
7.2 Genauigkeit der versprühten Brühmengen .....	27
7.2.1 Datenerfassung .....	28
7.2.2 Ergebnisse .....	28
7.3 Fazit .....	28
<b>8 Arbeitswirtschaftliche Aspekte</b> .....	<b>29</b>
8.1 Arbeitszeitbedarf .....	29
8.2 Methoden der Datenerfassung und Modellkalkulation .....	29
8.3 Ergebnisse .....	30
<b>9 Betriebswirtschaftliche Aspekte</b> .....	<b>33</b>
9.1 Kalkulationsgrundlagen .....	33
9.2 Weitere Annahmen und verwendete Werte .....	34
9.3 Ergebnisse .....	35
<b>10 Diskussion</b> .....	<b>38</b>
<b>11 Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>40</b>
<b>12 Dank</b> .....	<b>41</b>
<b>Appendix</b> .....	<b>41</b>

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurde basierend auf einem bereits marktreifen Hackroboter (Steketee IC Weeder, Machinefabriek Steketee B.V., NL) ein Pflanzenschutzroboter (PS-Roboter) gebaut, weiterentwickelt und auf einem Schweizer Gemüsebetrieb getestet und eingesetzt. Der PS-Roboter entfernt das Unkraut zwischen und in der Reihe und bringt Fungizide und Insektizide gezielt auf die Kulturpflanzen aus. Der offene Boden zwischen und in den Reihen wird praktisch nicht mit Pflanzenschutzmitteln (PSM) behandelt. Diese gezielte Applikation wird als Spotspraying bezeichnet. Sensoren und Bilderkennungssoftware erkennen die Reihen und Kulturpflanzen. Steuerungselemente bewegen die Hackmesser und schalten die Düsen ein und aus.

Das Projekt wurde von der Branche (VSGP, SZG, FFG), den Gemüsebaufachstellen der Kantone Bern (Inforama Ins) und Fribourg (IAG Grangeneuve), dem Industriepartner Möri AG, dem Gemüsebetrieb Wyssa Gemüse sowie Agroscope getragen. Das FiBL war mit seiner Expertise im Bereich Biolandbau am Projekt beteiligt. Das Projekt konnte dank der Teilfinanzierung seitens AgriQnet<sup>1</sup> durchgeführt werden.

Neben den technischen und agronomischen Versuchen wurden Arbeitsstudien und betriebswirtschaftliche Berechnungen durchgeführt. Bei den technischen Versuchen handelte es sich um Testfahrten in verschiedenen Gemüsekulturen, dabei wurde der PS-Roboter laufend optimiert. In Salat und in Pak-Choi wurden umfassende Versuche zur Bestimmung des Einsparpotentials an PSM durchgeführt. Die biologische Wirksamkeit dieser gezielten Applikationstechnologie im Vergleich zur flächigen Ausbringung wurde untersucht. Bei den Salaten wurden als Zielorganismen Blattläuse bekämpft, bei Pak-Choi Erdflöhe.

Der PS-Roboter funktionierte gut im Praxiseinsatz: Er erkannte die Kulturpflanzen zuverlässig, behandelte diese und entfernte das Unkraut. In Pak-Choi und Salat konnten in den Versuchen über die gesamte Kulturdauer 77 % und 75 % an Insektiziden im Vergleich zum Betriebsstandard «Feldbalken» eingespart werden. Im Vergleich zu einer theoretischen Bandspritzung betrug die Einsparung 40 %. Die biologische Wirksamkeit der Verfahren «PS-Roboter» und «Feldbalken» war vergleichbar. Auf Herbizide konnte ganz verzichtet werden. Während der Versuche waren die Wetterbedingungen gut und es konnte, wenn nötig, gegen die Schädlinge behandelt und das Unkraut gehackt werden. Nachteilig ist die durch das Hacken bedingte, geringe Fahrgeschwindigkeit von 1.5 km/h und die geringe Arbeitsbreite (1.5 m). In Jahren mit witterungsbedingt begrenzten Behandlungszeitfenstern wird die geringe Schlagkraft rasch limitierend werden. Bei Behandlungen in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien bedecken die Kulturpflanzen bereits einen grossen Teil des Bodens und das Einsparpotential an PSM ist gering. Für solche Behandlungen lohnt sich der Einsatz des PS-Roboters nicht mehr. Diese Applikationen sollten daher mit einer normalen Feldspritze mit einer hohen Flächenleistung durchgeführt werden.

In Zeitstudien wurden die Arbeitsabläufe auf Arbeitselementstufe erhoben. Die daraus resultierenden Kalkulationsmodelle ermöglichten eine Analyse der Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren, wie beispielsweise unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten und Arbeitsbreiten, auf die Arbeitsleistung. Diese beträgt 0.21 ha/h bei der derzeit maximal erreichten Fahrgeschwindigkeit von 1.5 km/h. Bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit auf 3 km/h könnte die Arbeitsleistung um 76 % auf 0.37 ha/h erhöht werden. Die Verdoppelung der Arbeitsbreite von 1.5 auf 3 m hat einen noch grösseren Effekt. Bei gleicher Fahrgeschwindigkeit von 1.5 km/h könnte eine Arbeitsleistung von 0.4 ha/h realisiert werden.

Am Beispiel von Freilandsalat wurde eine Standardstrategie (Feldbalken) mit einer innovativen Strategie (mit dem PS-Roboter) verglichen. Mit der innovativen Strategie kann die Menge an ausgebrachten PSM deutlich reduziert werden. Trotz der geringen Schlagkraft des PS-Roboters steigen die Pflanzenschutzkosten bei der innovativen Strategie im Vergleich zur Standardstrategie nicht. Mit den getroffenen Annahmen sind auch die gesamten Produktionskosten für die beiden Strategien nahezu gleich. Dies hängt stark damit zusammen, dass mit dem PS-Roboter «teure Handarbeit», d.h. Jäten, eingespart werden kann. Auf Betrieben mit geringem Unkrautdruck wäre die innovative Strategie hingegen noch nicht wirtschaftlich. Für solche Betriebe müsste eine schlagkräftigere, gezielte PSM-Applikation angestrebt werden.

<sup>1</sup> AgriQnet: Netzwerk aus Schweizer Bauernverband, Swiss Food Research, dem Verein Qualitätsstrategie und dem Bundesamt für Landwirtschaft zur Förderung innovativer Landwirtschaftsprojekte.



Im Rahmen eines Folgeprojekts wird ein neuer PS-Roboter gebaut und eingesetzt. Dieser ist nur noch für Spotspraying konzipiert. So sollen Fahrgeschwindigkeiten von 6 km/h im Feld realisiert werden. Es wird auch untersucht werden, wie stark die Einträge in die Umwelt (Drift und Abschwemmung) mit dieser gezielten Applikationstechnik reduziert werden können.

## Résumé

Dans le cadre de ce projet, un robot de protection des cultures a été conçu sur la base d'un robot de binage déjà commercialisé (Steketee IC Weeder), perfectionné, puis testé au cours de mises en pratique dans une exploitation maraîchère suisse. Le robot de protection des cultures élimine les mauvaises herbes entre et sur le rang tout en appliquant des fongicides et des insecticides de manière ciblée sur les plantes cultivées. Le sol nu, entre et sur les rangs, n'est quasiment pas traité. Cette application ciblée est nommée "spotspraying". La reconnaissance des rangs et des plantes cultivées se fait à l'aide de capteurs et d'un logiciel de reconnaissance d'images. Le déplacement des lames de sarclage ainsi que la mise en marche/arrêt des buses sont effectués à l'aide des éléments de commande.

Le projet a été porté par la filière (UMS, CCM, FRL), les centres de compétences spécialisés dans les cultures maraîchères des cantons de Berne (Inforama Ins) et de Fribourg (Grangeneuve IAG), le partenaire industriel Möri, l'exploitation maraîchère Wyssa Gemüse ainsi qu'Agroscope. Le FiBl a participé au projet par son expertise dans le domaine de l'agriculture biologique. Le projet a pu être réalisé grâce au financement partiel de la part d'AgriQnet<sup>2</sup>.

En plus des essais techniques et agronomiques, des études de charge de travail et des calculs de gestion économique ont été réalisés. Les essais techniques ont consisté en des tests de conduite dans différentes cultures de légumes permettant d'optimiser continuellement le prototype. Des essais complets ont été réalisés sur salades et pak-choi afin de déterminer les économies potentielles en produits phytosanitaires ainsi que l'efficacité biologique de cette technologie d'application ciblée par rapport à une application en plein. Les organismes cibles dans les salades étaient les pucerons, et les altises dans le pak-choi.

Dans la pratique, le robot de protection des cultures a bien fonctionné : il a reconnu les plantes cultivées de manière fiable, les a traitées et a éliminé les mauvaises herbes. Au cours des essais, sur la durée totale de la culture du pak-choi et de la salade, il a été possible d'économiser respectivement 77% et 75% d'insecticides par rapport aux applications standards de l'exploitation réalisées avec un pulvérisateur à rampe. En comparaison avec une pulvérisation en bande théorique, l'économie aurait été de 40%. Les niveaux d'efficacité biologique des modalités "robot de protection des cultures" et "pulvérisateur à rampe" étaient comparables. Il a été possible de renoncer complètement aux herbicides. Pendant les essais, les conditions météorologiques étaient bonnes et il était possible, si nécessaire, de traiter contre les ravageurs et de sarcler les mauvaises herbes. En raison du sarclage, les inconvénients sont la faible vitesse de travail (1,5 km/h) et la faible largeur de travail (1,5 m). Les années où les fenêtres de traitement seront limitées à cause des intempéries, cette faible performance deviendra rapidement limitante. Si par conséquent, les traitements étaient effectués plus tardivement, alors les plantes de cultures couvriraient déjà une grande proportion du sol et le potentiel d'économie des produits phytosanitaires serait amoindri. Pour de tels applications, l'emploi du robot de protection des cultures n'en vaudrait plus la peine. Ces applications devraient alors être effectuées au moyen d'un pulvérisateur à rampe classique car ayant un rendement par surface plus élevé.

Les études de charge de travail ont permis de déterminer les différentes étapes du processus de travail. Les modèles de calcul qui en ont résulté ont permis d'analyser l'influence des différents facteurs sur le rendement de travail, comme par exemple les différentes vitesses d'avancement ou les largeurs de travail. Ce rendement est de 0,21 ha/h à la vitesse d'avancement maximale actuellement atteinte de 1,5 km/h. En augmentant la vitesse à 3 km/h, le rendement pourrait être augmenté de 76 % pour atteindre 0,37 ha/h. Le doublement de la largeur de travail de 1,5 à 3 m aurait un effet encore plus important. Avec la même vitesse d'avancement de 1,5 km/h, un rendement de travail de 0,4 ha/h pourrait être obtenu.

En prenant l'exemple de la laitue de plein champ, deux stratégies ont été comparées. Une stratégie est standard (avec un pulvérisateur à rampe) et une stratégie est innovante (avec le robot phytosanitaire). La stratégie innovante permet de réduire considérablement la quantité de produits phytosanitaires utilisés. Malgré le faible rendement du robot phytosanitaire, les coûts de la protection des plantes n'augmentent pas avec la stratégie innovante par rapport à la stratégie standard. Avec les hypothèses retenues, les coûts de production totaux sont également presque identiques pour les deux stratégies. Cela est fortement lié au fait que le robot de protection des plantes permet d'écono-

<sup>2</sup> AgriQnet : réseau composé de l'Union suisse des paysans, Swiss Food Research, l'Association Stratégie Qualité et l'office fédéral de l'agriculture

miser le "travail manuel coûteux", c'est-à-dire le désherbage. En revanche, la stratégie innovante ne serait pas encore rentable dans les exploitations où la pression des mauvaises herbes est faible. Pour de telles exploitations, il faudrait tendre vers une application de Pph ciblée plus performante.

Dans le cadre de la suite du projet, un nouveau robot de protection des cultures sera construit et employé. Celui-ci est uniquement conçu pour le spotspraying. Ainsi, des vitesses d'avancement de 6 km/h devraient être réalisées en plein champ. Dans la mesure du possible, il sera également étudié dans quelle mesure les émissions de Pph dans l'environnement (dérive et ruissellement) pourront être réduites grâce à cette technique d'application ciblée.

## Summary

As part of this project, a plant protection robot based on an already market-ready hoeing robot (Steketee IC Weeder, Machinefabriek Steketee B.V., the Netherlands) was built, refined, and tested and deployed on a Swiss vegetable farm. The plant protection robot removes the weeds between and in the rows and applies fungicides and insecticides in a targeted manner on the crop plants, with almost no plant protection product (PPP) being delivered to the bare ground between and in the rows. This targeted application is termed 'spot-spraying'. Sensors and image recognition software identify the rows and crop plants. Control elements move the hoeing blades and switch the nozzles on and off.

The project was funded by the sector (VSGP [Association of Swiss Vegetable Producers], SZG [Swiss Central Office for Vegetable Production and Special Crops], FFG [Vegetable Research Forum]), the vegetable production agencies of the Cantons of Bern (Inforama Ins) and Fribourg (IAG Grangeneuve), the industry partner Möri AG, the Wyssa Gemüse vegetable farm and Agroscope. The FiBL [Research Institute of Organic Agriculture] with its expertise in organic farming was involved in the project. The project was implemented thanks to partial funding by AgriQnet<sup>3</sup>.

Work studies and economic calculations were performed in addition to the technical and agronomic trials. The technical trials consisted of test runs in various vegetable crops in which the plant protection robots were continually optimised. Comprehensive trials for determining the PPP savings potential in salad crops and bok choy were conducted. The efficacy of this targeted application technology in comparison to broadcast application was investigated. Aphids and flea beetles were controlled as target organisms in salad crops and bok choy, respectively.

The plant protection robot worked well in the field: it reliably recognised and treated the crop plants and removed the weeds. In bok choy and salad crops, 77% and 75% savings in insecticide use respectively were achieved over the entire cultivation period in the trials compared to the farm standard 'boom sprayer'. Savings over a theoretical row-crop spraying amounted to 40%. The bioefficacy of the 'plant protection robot' and 'boom sprayer' methods was comparable. Total avoidance of herbicides was possible. Weather conditions were good during the trials and pest control treatments and weed hoeing could be performed when necessary. Disadvantages were the low travelling speed of 1.5 km/h due to the hoeing, and the low working width (1.5 m). In years with limited treatment windows owing to weather conditions, the low area performance will quickly become limiting. With treatments carried out later in the season the crop plants already cover a large proportion of the ground and the PPP savings potential is low. The use of the plant protection robot is no longer worthwhile for such treatments, which should therefore be carried out with a normal field sprayer with a high area output.

In time studies, the workflows were recorded at work-element level. The resulting calculation models enabled an analysis of the effects of various influencing factors such as different travelling speeds and working widths on area performance, which stands at 0.21 ha/h at the current maximum achieved speed of 1.5 km/h. By increasing the speed to 3 km/h, output could be raised by 76% to 0.37 ha/h. Doubling the working width from 1.5 to 3 m would have an even greater effect: at the same travelling speed of 1.5 km/h, an output of 0.4 ha/h could be achieved.

Using the example of field salad crops, a standard strategy ('boom sprayer') was compared with an innovative strategy ('plant protection robot'). With the innovative strategy, the amount of PPP applied can be reduced significantly. Despite the low impact of the plant protection robot, plant protection costs for the innovative strategy do not increase compared to the standard strategy. With the assumptions made, the total production costs for both strategies are also nearly the same. This is largely because "expensive manual work", i.e. weeding, can be saved on with the plant protection robot. On farms with low weed pressure, however, the innovative strategy would not yet be cost-effective. For such farms, a higher-impact, targeted PPP application would need to be pursued.

As part of a follow-up project, a new plant protection robot is being built and deployed. Designed only for spot-spraying, it is meant to achieve travelling speeds of 6 km/h in the field. The extent to which this targeted application technique can reduce inputs into the environment (drift and run-off) will also be investigated.

<sup>3</sup> AgriQnet: A network for the promotion of innovative agricultural projects, comprising the Swiss Farmers' Union, Swiss Food Research, the Quality Strategy Association and the Federal Office for Agriculture.



# 1 Projektziele

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein PS-Roboter für den Gemüsebau entwickelt. Das Gerät hackt das Unkraut in Reihenkulturen in und zwischen den Reihen und bringt die Insektizide und Fungizide gezielt auf die Kulturpflanzen aus. So können erhebliche Mengen an PSM eingespart werden. Neben agronomischen und agrartechnischen Untersuchungen zur Optimierung des Praxiseinsatzes des PS-Roboters vom Typ Steketee IC wurden ergänzend Arbeitsstudien und betriebswirtschaftliche Analysen durchgeführt. Die neuen Erkenntnisse sollen zudem in die Bildung und Beratung einfließen.

## 2 Einleitung und Problemstellung

Praxiserfahrungen zeigen, dass dank moderner Hackroboter wie beispielsweise des Typs Steketee IC (<https://www.steketee.com/de/producten/ic-weeder-4/>) unter optimalen Einsatzbedingungen beachtliche Mengen an Herbiziden eingespart werden können. Die auf der digitalen Bildverarbeitung basierende Steuerungstechnik lässt bewegliche Hackmesser zielgerichtet ein- und ausschwenken, sodass auch das Unkraut in den Kulturreihen maschinell bekämpft werden kann. Die Praxisreife ist jedoch gegenwärtig auf einzelne klassische Reihenkulturen im Acker- und Gemüsebau beschränkt.

Dieser sich bereits im praktischen Einsatz befindende Hackroboter soll nun im Rahmen dieses Projektes zu einem multifunktionalen PS-Roboter mit Spotspraying ausgebaut werden, mit dem bei Bedarf bei den einzelnen Hackdurchgängen gleichzeitig eine Behandlung mit Fungiziden oder Insektiziden durchgeführt werden kann. Dabei sollen die Kulturpflanzen und Reihen über Bilderfassung und -verarbeitung lokalisiert und vermessen werden, sodass die Kulturpflanzen von den optimal ausgerichteten Spritzdüsen zielgerichtet behandelt werden können. Dies im Gegensatz zu einem herkömmlichen Feldbalken, welcher die ganze Fläche behandelt, auch die offene Bodenoberfläche im Zwischenreihenbereich und zwischen den Einzelpflanzen in den Reihen.

Die Projektpartner erwarten, dass mit dieser gezielten Applikationstechnologie, d.h. mit dem Einsatz von PS-Robotern, im Freilandgemüsebau künftig zwischen 40 % und 70 % an PSM in Reihenkulturen eingespart werden könnten. Dies fördert einen ressourcenschonenden, nachhaltigen Einsatz von PSM.

Angesichts der Vielzahl an verschiedenen Gemüsearten mit unterschiedlicher Bestandsstruktur und damit verbundenen unterschiedlichen Ansprüchen an den PSM-Einsatz sowie der regional unterschiedlichen Anbaubedingungen sind die Entwicklung und Praxiseinführung einer solchen neuen Pflanzenschutztechnik im Gemüsebau sehr aufwändig. Dies führt dazu, dass innovative Verfahren in diesem Bereich von den Herstellern - wenn überhaupt - lediglich in Ackerkulturen bis zur Praxisreife vorangetrieben werden.

Um das Hauptziel der vorliegenden Studie zu erreichen, nämlich die Reduktion der Menge der eingesetzten PSM, kann eine neue digitale Technologie vielversprechend sein. Bei der Entwicklung bis zur Praxisreife muss das gesamte System betrachtet werden, also auch die arbeitsorganisatorischen und wirtschaftlichen Aspekte. Deshalb wurden die technischen Versuche von Arbeitsstudien begleitet. Die Ergebnisse zur zeitlichen Arbeitsbelastung fließen direkt in die Teilkostenberechnungen ein.

Um auch für den Gemüsebau spezifische, umweltschonende Technologien zu entwickeln und bis zur Praxisreife voranzutreiben, ist die Förderung entsprechender Projekte durch die öffentliche Hand unerlässlich. Das vorliegende Projekt wurde ermöglicht durch eine Finanzhilfe für die Jahre 2017-2020, gestützt auf die Verordnung vom 23. Oktober 2013 über die Förderung von Qualität und Nachhaltigkeit in der Land- und Ernährungswirtschaft (QuNaV). Die entsprechende Verfügung wurde am 15.12.2017 erlassen.

### 3 Neuer Pflanzenschutzroboter

Beim neuen Pflanzenschutzroboter (PS-Roboter) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des bereits kommerziell erhältlichen Unkrauthackroboters Steketee IC Weeder. Mit Hilfe von Kameras und weiteren Sensoren unterscheidet dieser Hackroboter zwischen Unkraut und Kulturpflanzen. Dies ermöglicht ein präzises Hacken in und zwischen den Reihen. Das bereits bestehende System wurde erweitert, damit mit dem neuen Roboter zusätzlich die Kulturpflanzen gezielt mit Fungiziden und Insektiziden behandelt werden können (Spotspraying). Das Anbaugerät ist traktorgezogen, es handelt sich somit nicht um ein autonomes Gerät. Ein Fahrer steuert den Traktor, nimmt die Einstellungen vor und überwacht die Arbeit des PS-Roboters.

Der Prototyp besteht aus vier Werkzeughaltern mit einem Block von Magnetventilen für das Ausbringen der PSM und festen und beweglichen Hackmessern (Abbildung 1). Alle Magnetventile und Hackmesser können unabhängig voneinander aktiviert werden. Der Prototyp ermöglicht gleichzeitig eine gezielte Behandlung der Kulturpflanzen und das Hacken zwischen und in den Reihen. Die realisierte Arbeitsgeschwindigkeit beträgt etwa 1.5 km/h.

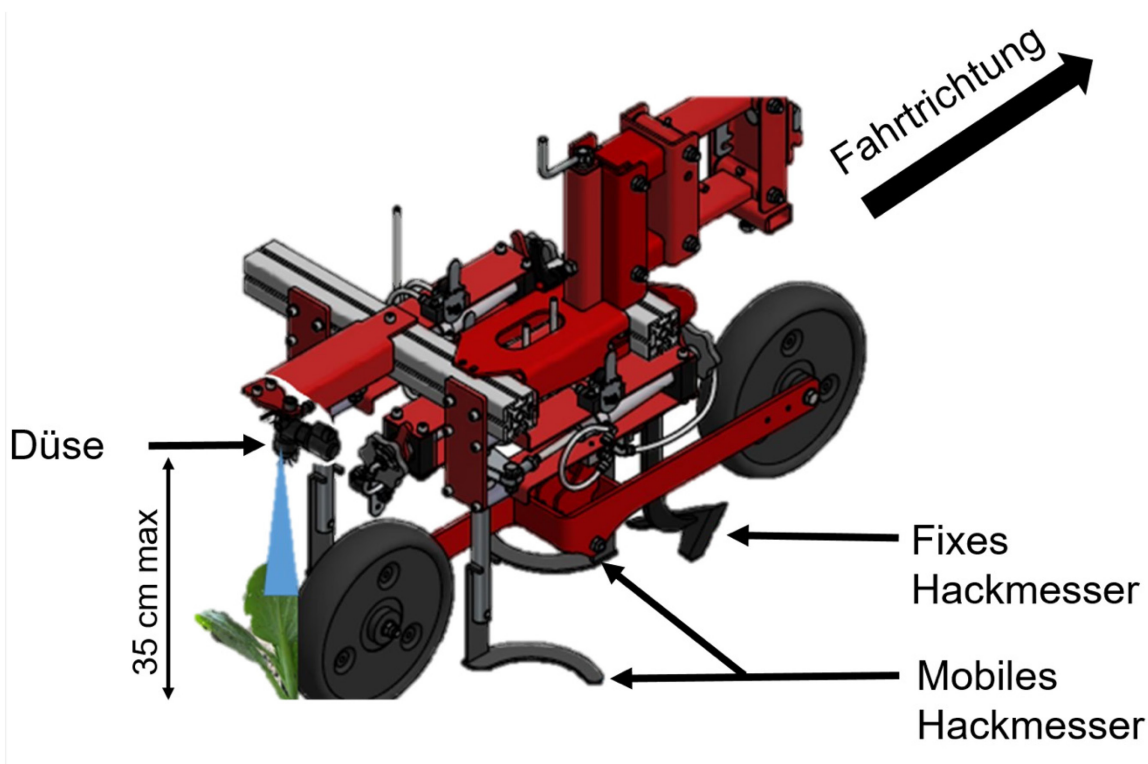


Abbildung 1: Darstellung eines der insgesamt vier Werkzeughalter des Prototyps (Darstellung zur Verfügung gestellt von Steketee und modifiziert).

Die eingebauten Kameras des Prototyps übertragen die Bilder an den Computer. Dieser analysiert sie und unterscheidet zwischen Kulturpflanzen und Unkräutern. Er koordiniert einerseits die Aktivierung und Deaktivierung der mobilen Hackmesser zur Entfernung des Unkrauts in den Reihen, andererseits öffnet und schliesst er die Magnetventile für das Spotspraying der Kulturpflanze mit Fungiziden und/oder Insektiziden. Dadurch wird nur die von den Kulturpflanzen bedeckte Fläche mit PSM behandelt (Abbildung 2). So können je nach Entwicklungsstadium der Kultur mehr oder weniger grosse Mengen an PSM eingespart werden.

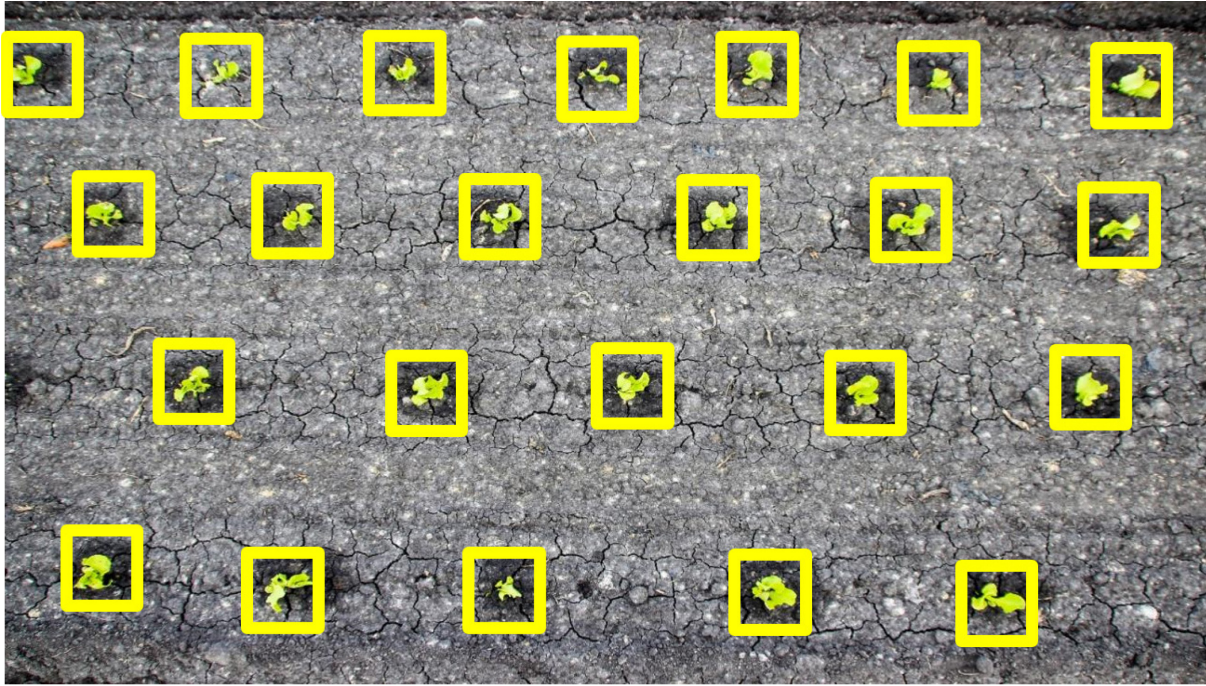


Abbildung 2: Mit Spotspraying können die Salatpflanzen gezielt behandelt werden (gelbe Rechtecke).

## 4 Projektverlauf

Von 2018 bis 2020 wurden **Feldversuche** in **Salat** und **Pak-Choi** durchgeführt (Abbildung 3, Seite 14). In diesen Versuchen wurden sowohl das Einsparpotential als auch die biologische Wirksamkeit der Spotspraying-Technologie im Vergleich zum Feldbalken bestimmt. Ausserdem wurden Erfahrungen im Umgang mit dem PS-Roboter gesammelt. Mit Spotspraying konnten deutliche Mengen an PSM eingespart werden und dies ohne Einbussen bei der Wirksamkeit. Die Gesamtergebnisse dieser Versuche wurden in einem full conference paper (Haberey et al., 2021a) zusammengestellt und an derselben Konferenz (European Conference on Precision Agriculture, 2021, Budapest, Hungary) im Rahmen eines Vortrags vorgestellt (siehe Kapitel 5). Zusätzlich wurden **Testfahrten in gepflanzter Petersilie, gepflanzten Bundzwiebeln** und **Sellerie** durchgeführt (siehe Kapitel 6).

Während der Projektjahre wurden **Pflanzenparameter** wie Gewicht, Durchmesser, Höhe und Blattfläche über die Kulturdauer von Salat, Pak-Choi und Fenchel erhoben. Dadurch verfügen wir über einen relativ **grossen Datensatz**, anhand dessen Abschätzungen zum theoretischen Einsparpotential möglich sind.

Damit das Einsparpotential dieser Technologie realisiert werden kann, muss vorgängig anhand weniger Messungen im Feld abgeschätzt werden können, wie viel Brühe angesetzt werden muss. Kurz ausgeführt: Wird zu viel Brühe angesetzt, verbleiben Restmengen im Tank und das Einsparpotential wird dadurch nicht ausgeschöpft. Restmengen müssen ausserdem sicher entsorgt werden. Wird hingegen zu wenig Brühe angesetzt, verringert dies die Effizienz massiv, da nochmals Spritzbrühe hergerichtet werden muss. Bei der Flächenapplikation lässt sich die benötigte Brühmenge einfach berechnen. Nur die Grösse der Fläche und die gewünschte Wasseraufwandmenge sind erforderlich. Bei der Spotspraying-Technologie hingegen hängt die erforderliche Brühmenge von weiteren Faktoren ab: Pflanzdichte, Pflanzengrösse, Düsenhöhe etc. Im Rahmen des Projekts wurde ein **Dosierschema** in Form einer Spreadsheet-Applikation erstellt. Während der üblichen Kulturkontrollen misst der Gemüseproduzent den Durchmesser sowie die Höhe von 20 Pflanzen. Mithilfe dieser Grössen und der Angabe von Düse, Druck, Düsenhöhe und Fahrgeschwindigkeit bestimmt die Spreadsheet-Applikation, wie viel Brühe angesetzt werden muss. Anhand umfangreicher Messungen im Feld wurde 2020 geprüft, ob das Dosierschema die Menge genügend genau vorhersagt. Es konnte gezeigt werden, dass im Einsatzbereich des PS-Roboters (kleinere Kulturstadien) das Dosierschema ausreichend genau ist. Die Ergebnisse dazu wurden in Haberey et al. (2021b) vorgestellt (siehe Kapitel 7).

Für den Einsatz des PS-Roboters (Kombination Hacken und Spritzen) sind die **Witterungsbedingungen** entscheidend: Es muss trocken sein. Da die Schlagkraft tief ist (Arbeitsbreite 1.5 m, Fahrgeschwindigkeit 1.5 km/h), braucht die Behandlung viel Zeit. Sind die Zeitfenster für die Bearbeitung bzw. Behandlung kurz, wird die tiefe Schlagkraft rasch limitierend. Damit auch während nassen Perioden der Schutz der Kulturen einigermaßen gewährleistet werden kann, muss für solche Phasen eine Standardfeldspritze auf dem Betrieb verfügbar sein. Diese wird auch für die Behandlung späterer Kulturstadien benötigt, wenn das Einsparpotential bei den PSM durch Spotspraying in keinem Verhältnis mehr zum zeitlichen Mehraufwand steht.

2018 und 2019 sowie mehrheitlich 2020 hatten wir trockene und warme Bedingungen, sodass der PS-Roboter häufig eingesetzt werden konnte, was auch die Versuche relativ planbar machte. 2021 ergab sich ein ganz anderes Bild (Abbildung 4). Es war über Wochen nass und es konnte viel weniger oft mit dem PS-Roboter gefahren werden als die Jahre davor. Dementsprechend wurden die wenigen möglichen Einsatzfenster des Geräts im Rahmen des Projekts prioritär für die **Arbeitsstudien** eingesetzt und keine Wirksamkeitsversuche mehr durchgeführt (siehe Kapitel 8). Es ist anzumerken, dass unter diesen Bedingungen auch der Einsatz von schlagkräftigen Applikationsgeräten wie Feldspritzen nicht mehr möglich war. Es kam zu massiven Ertragsausfällen.

Bei den Arbeitsstudien wurde vor allem das kameragesteuerte Hacken untersucht. Die Zeitstudienreihe hat erst im Jahr 2019 begonnen, da im ersten Projektjahr (2018) vor allem Testfahrten zur Optimierung des Einsatzes des Prototyps unter Praxisbedingungen durchgeführt wurden. Diese waren nicht geeignet für eine Analyse des Arbeitsablaufes. Die Datenerhebung erfolgte mittels Videoaufnahmen, jedoch konnten nicht alle Videosequenzen, die während der Betriebsbesuche entstanden sind, für die Analyse verwendet werden (siehe hierzu auch den Abschnitt «Störungen» in Kap. 8.3). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die auswertbaren Zeitstudien.



In 2021 hätten an möglichst vielen Terminen Videoaufnahmen erstellt werden sollen, um erste Ergebnisse aus 2019 und 2020 zu validieren. Durch die schwierigen Witterungsbedingungen (siehe oben) lagen die verfügbaren Feldarbeitstage jedoch deutlich unter dem langjährigen Mittel. Deshalb kann der Einfluss verschiedener Parameter auf den Einsatz des Prototyps, beispielsweise die Arbeitsperson, die Kultur oder das Wachstumsstadium, in diesem Bericht nur beschreibend diskutiert werden.

Aufbauend auf den arbeitswirtschaftlichen Analysen wurden die Kosten für die Produktion einer Hektare Salat berechnet bei Verwendung des PS-Roboters. Diese wurden mit den Kosten bei Verwendung der Standardtechnik bzw. Standardstrategie verglichen (siehe Kapitel 9).

2018



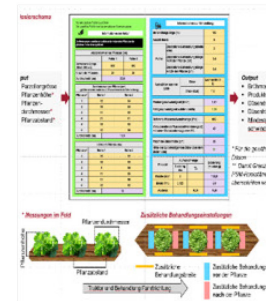
- Inbetriebnahme Prototyp im Feld
- Ausmerzen von Kinderkrankheiten
- Erste Wirksamkeitsversuche (Salat)
- Erste Testfahrt in Pak-Choi
- Erhebung von Kulturparametern

2019



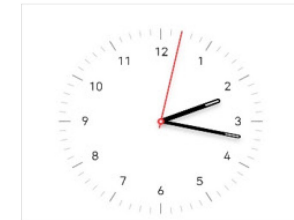
- Weitere Wirksamkeitsversuche (Salat & Pak-Choi)
- Erste Testfahrten in Bundzwiebeln & Petersilie
- Erhebung von Kulturparametern

2020



- Weiterer Wirksamkeitsversuch (Pak-Choi, 1 Satz)
- Erste Testfahrten in Sellerie
- Erhebung von Kulturparametern
- Entwicklung Dosierschema (konzeptionell)
  - Testen und Anpassung Dosierschema im Feld

2021



- Einzelne, zusätzliche Erhebungen
- Präsentation der Ergebnisse 2018-2020 an der European Conference on Precision Agriculture
- Fokus Arbeitsstudien (arbeits- und betriebswirtschaftliche Untersuchungen)

Abbildung 3: Schematische Übersicht über die während der Projektjahre durchgeführten Arbeiten.

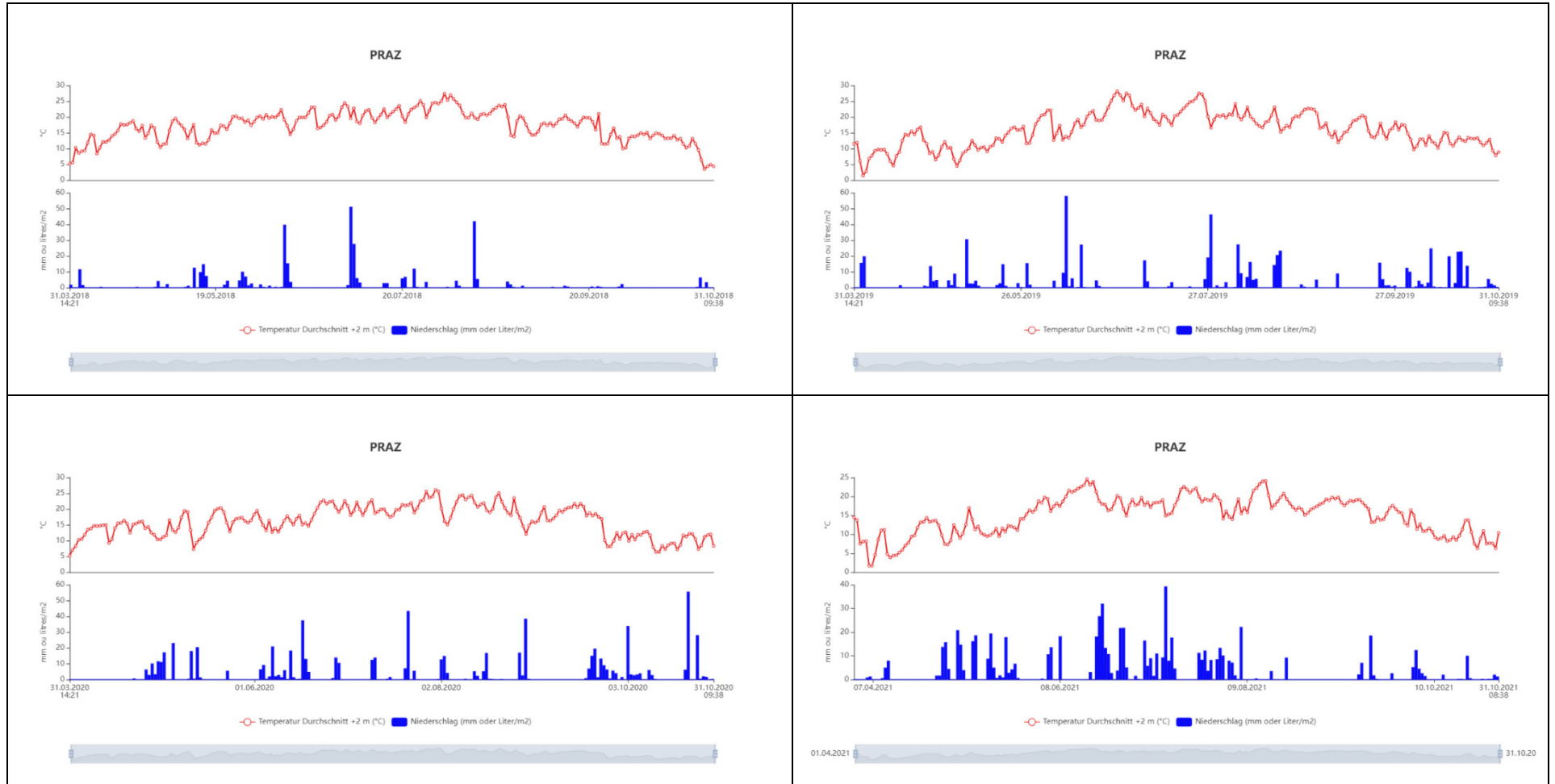


Abbildung 4: Wettergraphiken, automatisch generiert von [www.agrometeo.ch](http://www.agrometeo.ch) für die nächstgelegene Wetterstation «Praz». Für 2018, 2019, 2020 und 2021 sind die Zeiträume von April bis Oktober dargestellt. Zu beachten ist, dass die y-Achsenkalibrierung beim Jahr 2021 abweicht. Dennoch ist klar ersichtlich, dass es 2021 deutlich mehr und längere niederschlagsreiche Perioden gab. Für die Zeiträume April bis Oktober betragen die akkumulierten Niederschlagsmengen: 354 l/m<sup>2</sup> (2018), 678 l/m<sup>2</sup> (2019), 708 l/m<sup>2</sup> (2020) & 714 l/m<sup>2</sup> (2021) bzw. mm/m<sup>2</sup>.

**Tabelle 1:** Auswertbare Zeitstudien von 2019 bis 2021, Betrieb Wyssa Gemüse, Galmiz.

Aufnahmedatum	Video-Nr.	Kultur	Inhalt
25.08.2021	1	Kopfsalat grün/ Batavia grün/ Kohlraben/ Eichblatt grün	Hacken
	2	Eichblatt grün/ Kopfsalat grün	Hacken
	3	Batavia grün & rot/ Kopfsalat grün/ Eichblatt grün & rot	Hacken
	4	Batavia grün & rot/ Kopfsalat grün	Einfahrt ins Beet und Hacken
	5	Eichblatt grün	Hacken
01.09.2021	1	Kopfsalat/ Lattich	Hacken
	2	Kopfsalat/ Lattich	Hacken
	3	Kopfsalat/ Endivie	Hacken
	4	Kopfsalat/ Endivie	Hacken
03.09.2021	1	Kopfsalat/ Eisberg/ Lollo rosso	Hacken
	2	Lollo rot/ Batavia/ Kopfsalat	Hacken
	3	Kopfsalat/ Lattich/ Kopfsalat/ Eichblatt grün/ Lattich	Hacken
	4	Eichblatt rot & grün Eichblatt	Hacken
	5	Eichblatt grün	Hacken
16.05.2020	1	Fenchel	Herausfahren aus dem Beet, Beginn Wenden, Unterbrechungen
20.05.2020	1	Pak Choi	Hacken
	2	Pak Choi	Hacken
23.06.2020	1	Knollensellerie	Hacken und Rohre verlegen
	2	Salat	Hacken
24.06.2020	1	Knollensellerie	Hacken
	2	Salat	Hacken
	3	Eichblatt rot & grün/ Kopfsalat/ Lollo	Hacken, Neumontage Schare, Leitungen weglegen
	4	Eichblatt rot & grün/ Kopfsalat/ Lollo	Hacken
18.07.2019	1	Eichblattsalat grün	Einfahren in Feld, dann Hacken
	2	Eichblattsalat grün	Hacken
	3	Eichblattsalat grün	Hacken
	4	Eichblattsalat grün	Hacken
	5	Eichblattsalat grün & rot	Umstellung auf Eichblattsalat rot, Hacken
	6	Eichblattsalat grün	Hacken, Wenden
	7	Eichblattsalat grün	Fortsetzung Wenden
	8	Eichblattsalat grün	Wenden
25.07.2019	1	Fenchel/ Zucchini	Spritze füllen (Ausbringmenge 800 l/ha)
	2	Fenchel	Behandlung Fenchel
	3	Zucchini	Behandlung Zucchini
	4	Bundzwiebeln/ Salat	Spritze füllen (Ausbringmenge 800 l/ha)
	5	Bundzwiebeln	Positionierung Spritze, Unterbrechung
	6	Bundzwiebeln	Behandlung Bundzwiebeln
11.09.2019	1	Pak Choi	Applikation OHNE Hacken
	2	Pak Choi	Applikation OHNE Hacken
	3	Pak Choi	Applikation OHNE Hacken, Fahrt zum Hof, Entleeren und Spülen der Spritze, Einparken, Montage der acht Hackmesser
01.10.2019	1	Petersilie	Einfahrt ins Beet, Aufnahme einer neuen Kultur (Petersilie) in die Software
	2	Pak Choi	Einfahrt ins Feld, Hacken ohne Spritzen
	3	Pak Choi	Einfahrt ins Feld
	4	Pak Choi	Einfahrt ins Feld, Einstellung der Pflanzen-Parameter in der Software, manuelle Tiefeneinstellung der Parallelogramme



## 5 Einsparpotential und biologische Wirksamkeit

Basierend auf der Präsentation, gehalten an der European Conference on Precision Agriculture, 2021 in Budapest, werden hier die Ergebnisse der Feldversuche nochmals zusammenfassend vorgestellt. Die Ergebnisse wurden auch als full paper im Konferenzband in englischer Sprache veröffentlicht ([https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9\\_13](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_13); Haberey et al., 2021a).

### 5.1 Ausgangslage

Zur Bekämpfung von Schädlingen und Krankheiten in Feldgemüsekulturen werden PSM überwiegend flächig ausgebracht. Dies ermöglicht hohe Fahrgeschwindigkeiten und schlagkräftige Arbeitsbreiten. Es genügt, die Fläche des Feldes und die gewünschte Wasseraufwandmenge zu kennen, um die erforderliche Brühmenge zu berechnen. Allerdings weist diese Methode auch Nachteile auf. In frühen Entwicklungsstadien der Kultur gelangt eine grosse Menge der mit einem Feldbalken applizierten Insektizide und Fungizide nahezu ungenutzt auf den Boden. So besteht die Gefahr, dass Bodenorganismen beeinträchtigt werden, die nicht zu den Zielorganismen gehören. Wirkstoffe, die auf den Boden gelangen, werden auch vermehrt abgeschwemmt und können Oberflächen- und Grundwasser belasten.

Sowohl Konsumenten als auch politische Entscheidungsträger fordern einen nachhaltigeren Einsatz von PSM. Deshalb formulierte beispielsweise die Europäische Kommission im Rahmen der Farm-to-Fork-Strategie im Jahr 2020 das Ziel, den Einsatz und die Risiken chemischer PSM bis 2030 um 50 % zu reduzieren.

Gemüsekulturen werden entweder gesät oder in jungen Stadien gepflanzt und hauptsächlich in Reihen angebaut. Dadurch bleibt der Boden über eine längere Phase der Kultur unbedeckt. 2018 führten wir Messungen der Bodenbedeckung in Salat- und Pak-Choi-Kulturen durch. Abbildung 5 zeigt, dass sowohl die Salat- wie auch die Pak-Choi-Pflanzen in den ersten Wochen nach der Pflanzung weniger als 50 % des Bodens bedecken.

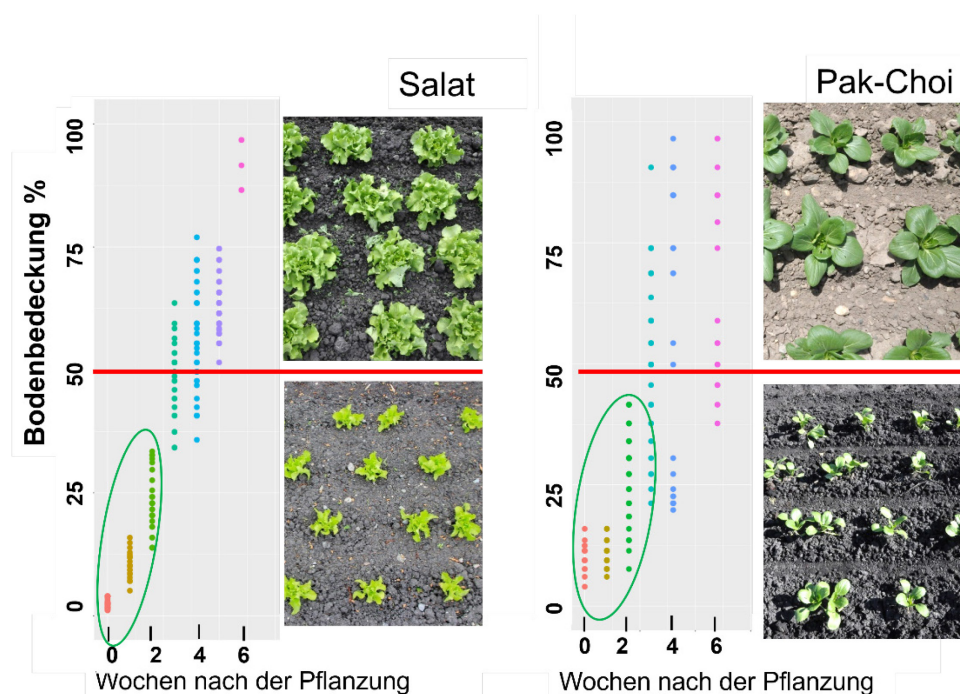


Abbildung 5: Es ist die Zunahme der Bedeckung des Bodens durch die Kulturpflanzen (Salat: links, Pak Choi: rechts) im Verlauf der Zeit dargestellt. Zu Beginn bedecken die Kulturpflanzen nur sehr wenig Boden.

## 5.2 Ziele der Studie

Die Versuche sollten zeigen, welche Menge PSM durch die gezielte Anwendung mit dem Prototyp im Vergleich zur herkömmlichen Applikation eingespart werden kann. Auch die Frage, ob die Wirksamkeit der PSM durch die reduzierte Menge beeinträchtigt wird, musste geklärt werden.

## 5.3 Material und Methoden

### 5.3.1 Design der Feldversuche

Die Versuche wurden in Salat und Pak-Choi auf Feldern eines kommerziellen Gemüsebetriebs in der Schweiz durchgeführt. Für jede Kultur wurden 3 Behandlungen getestet:

- Eine Kontrolle ohne Anwendung von PSM
- Ausbringung der PSM mit einem Feldbalken
- Ausbringung der PSM mit dem Prototyp

Die mit dem Feldbalken bzw. mit dem Prototyp behandelten Parzellen waren mindestens 400 m<sup>2</sup> gross. Die unbehandelten Kontrollparzellen befanden sich in jedem Block zwischen den beiden Behandlungsverfahren mit PSM und waren nur 30 m<sup>2</sup> gross, um eine auf das ganze Feld übergreifende, übermässige Vermehrung der Schädlingspopulationen zu verhindern. Der Versuch mit Salat umfasste 6 Blöcke, der Versuch mit Pak-Choi 4 Blöcke.

### 5.3.2 Brühmenge/ha

Die Ausbringung mit dem Feldbalken erfolgte durch den Gemüsebetrieb mit den auf die Schaderreger abgestimmten Insektiziden und der betriebsüblichen Brühmenge pro Hektar. Diese beträgt 800 l/ha. Die vom Prototyp ausgebrachte Brühmenge pro Hektar variierte je nach der von der Kultur bedeckten Bodenfläche. Zur Schätzung des notwendigen Volumens wurde für jede Behandlung eine Simulation mit Wasser auf einem 40 Meter langen 4-reihigen Beet durchgeführt. Das versprühte Wasser wurde gesammelt und das Volumen gemessen. Die prozentuale Einsparung an PSM pro Behandlung ergibt sich aus dem Verhältnis der mit dem Prototyp pro Hektar ausgebrachten Menge im Vergleich zu den 800 Litern pro Hektar bei Verwendung des Feldbalkens. Beim Feldbalken und beim Prototyp wurden dieselben Produkte und Konzentrationen verwendet.

Die Genauigkeit der Behandlung wurde mit wassersensitivem Papier überprüft. Tests gaben Aufschluss darüber, wie gut die Kulturpflanzen von der Kamera erkannt werden. Von den mehr als 350 geprüften Pflanzen erkannte der Prototyp alle und behandelte diese genau, d.h. das Sprayen setzte am Anfang der Pflanze ein und stoppte, wenn das Ende der Pflanze erreicht war. Die Fläche zwischen den Pflanzen wurde nicht behandelt.

### 5.3.3 Bestimmung der Wirksamkeit

Die Wirksamkeit der Produkte wurde kurz vor der Ernte mittels einer Stichprobe von je sieben benachbarten Pflanzen in drei Unterparzellen pro Behandlung bewertet.

Die zu bekämpfenden Schädlinge bei Salat waren Blattläuse. Die Wirksamkeit der Produkte wurde anhand des prozentualen Anteils der mit mindestens einer Blattlaus befallenen Salatköpfe ermittelt, da von den Konsumentinnen und Konsumenten Salat ohne Blattläuse erwartet wird. Bei Pak-Choi waren Erdflöhe die Zielorganismen. Hier wurde die Wirksamkeit anhand mehrerer Kriterien bestimmt. Ein Kriterium waren Frassschäden pro Pflanze. Sie wurden mit einer Skala von 1 bis 6 bewertet. Ein Wert von 1 bedeutet, dass die Pflanze überhaupt keine Frassschäden aufweist. Ein Wert von 2 entspricht einer Schädigung von bis 2 % der Blattoberfläche. Eine 3 entspricht einer Schädigung von 3 bis 5 % der Blattoberfläche. Eine 4 entspricht einer Schädigung von 6 bis 10 % der Blattoberfläche. Ein Wert von 5 entspricht einer Schädigung von 11 bis 25 %, und ein Wert von 6 einem Anteil von mehr als 25 % geschädigter Blattfläche<sup>4</sup>. Zu den weiteren Kriterien gehörten die Blattfläche und das Gewicht pro Pflanze nach dem Entfernen von Blättern mit Frassspuren.

Zur Berechnung der von den Pflanzen an jedem Behandlungstag bedeckten Fläche wurden alle Pflanzen in einem 40 Meter langen Beet gezählt und die Durchmesser von mindestens 15 Pflanzen gemessen.

<sup>4</sup> EPPO 2002. Guidelines for the efficiency evaluation of insecticides. Phyllotreta spp. on rape. OEPP/EPPO, 32, 361-365.

## 5.4 Ergebnisse

### 5.4.1 Pflanzenschutzmittel-Einsparungen

Die maximale Kulturdauer in den Versuchen betrug bei Salat 43 Tage und bei Pak-Choi 29 Tage. Das Pflanzenwachstum war konstant und die Grösse der Kulturpflanzen einheitlich. Alle Behandlungen wurden zwischen dem 3. und 29. Tag nach der Pflanzung durchgeführt. Wie aus dem Diagramm (Abbildung 6) hervorgeht, verhalten sich die PSM-Einsparungen umgekehrt proportional zum Anteil der Bodenfläche, die zum entsprechenden Zeitpunkt von der Kulturpflanze bedeckt war. Zu Beginn der Kultur, als die Pak-Choi-Pflanzen etwa 10 % des Bodens bedeckten, sparte der Prototyp beispielsweise gegenüber dem Feldbalken 85 % an PSM ein. 21 Tage nach der Pflanzung, als die Pflanzen durchschnittlich 55 % des Bodens bedeckten, wurde mit dem Prototyp eine Einsparung von 65 % erzielt. Über den gesamten Zeitraum wurden gegenüber dem Feldbalken durchschnittlich 75 % weniger PSM eingesetzt.

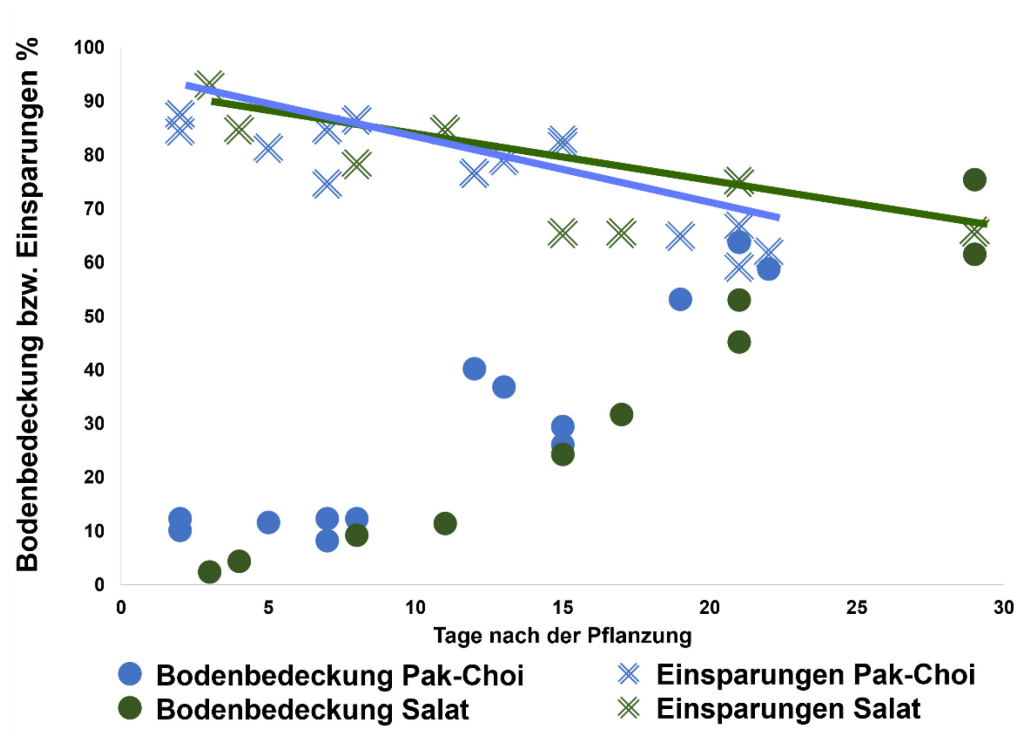


Abbildung 6: Es sind die prozentuale Bedeckung des Bodens (Deckungsgrad) durch die Pak-Choi (blau) und die Salatpflanzen (grün) im Verlauf der Kulturdauer sowie das mit Spotspraying erzielte Einsparpotential im Vergleich zur flächigen Behandlung dargestellt.

Überraschend ist, dass selbst bei einer Bodenbedeckung von mehr als 50 % immer noch eine Einsparung von mehr als 65 % erzielt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Prototyp vom Prinzip her wie eine Bandspritzung konzipiert ist (Abbildung 7). Mit dieser Ausbringungsmethode können bereits dadurch PSM eingespart werden, dass eine geringere Fläche behandelt wird. Da die zu behandelnde Fläche kleiner ist, haben die Düsen einen geringeren Durchfluss und einen tieferen Arbeitsdruck als die Düsen eines Feldbalkens. Selbst bei ununterbrochenem Spritzen würde der Prototyp also nicht 800 l/ha ausbringen, sondern nur etwa 320 l/ha.

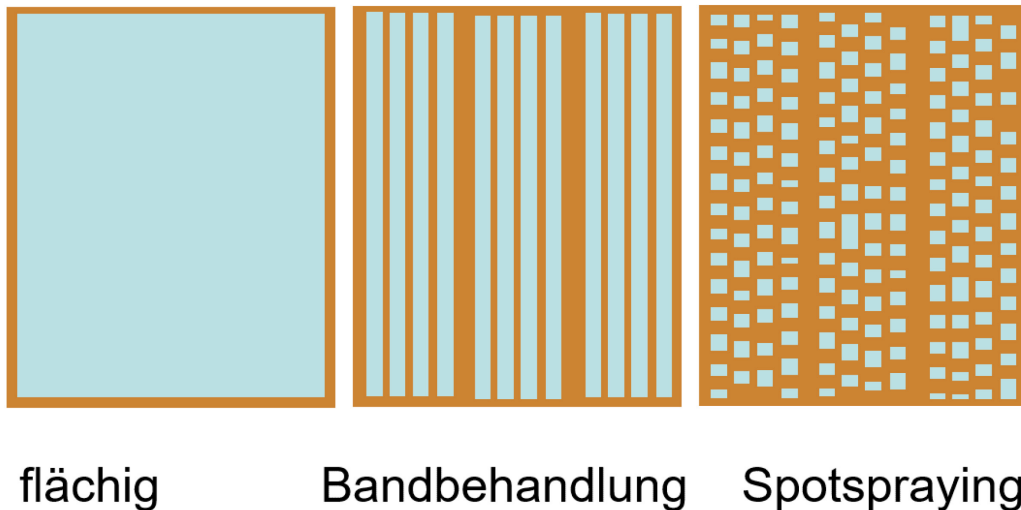


Abbildung 7: Schematische Darstellung, wieviel der Fläche bei einer flächigen (links), bei einer Band- (Mitte) und bei einer Spotspraying-Applikation (rechts) behandelt wird. Die unterschiedlichen Bandabstände bei der Bandbehandlung ergeben sich durch den Beetanbau (4 Reihen pro Beet). Das Gleiche gilt für Spotspraying, bei diesem wird die Banddüse kurz vor der einzelnen Kulturpflanze ein und nach der Pflanze ausgeschaltet. Die Variabilität in der Größe der behandelten «Rechtecke» entsteht durch die Variabilität im Feld.

Vergleicht man die Menge, die bei einer Bandspritzung ohne Unterbrechung benötigt wird, mit derjenigen, die der Prototyp mit einem Sprühstopp zwischen den Kulturpflanzen ausbringt, lässt sich die prozentuale Einsparung von PSM durch die Spotspraying-Methode im Vergleich zur Bandspritzung schätzen. Anhand der entsprechenden Werte kann abgeleitet werden, dass bei den ersten Behandlungen, wenn die Kultur etwa 10 % des Bodens bedeckt, etwa 50 % PSM und bei Behandlungen zum Zeitpunkt 21 Tage nach der Pflanzung, wenn die Kultur etwa 55 % des Bodens bedeckt, etwa 30 % PSM eingespart werden. Dies entspräche einer durchschnittlichen Einsparung an PSM von etwa 40 % über die gesamte Dauer der Salat- oder Pak-Choi-Kultur im Vergleich zu einer Bandspritzung mit 320 l/ha (Abbildung 8).

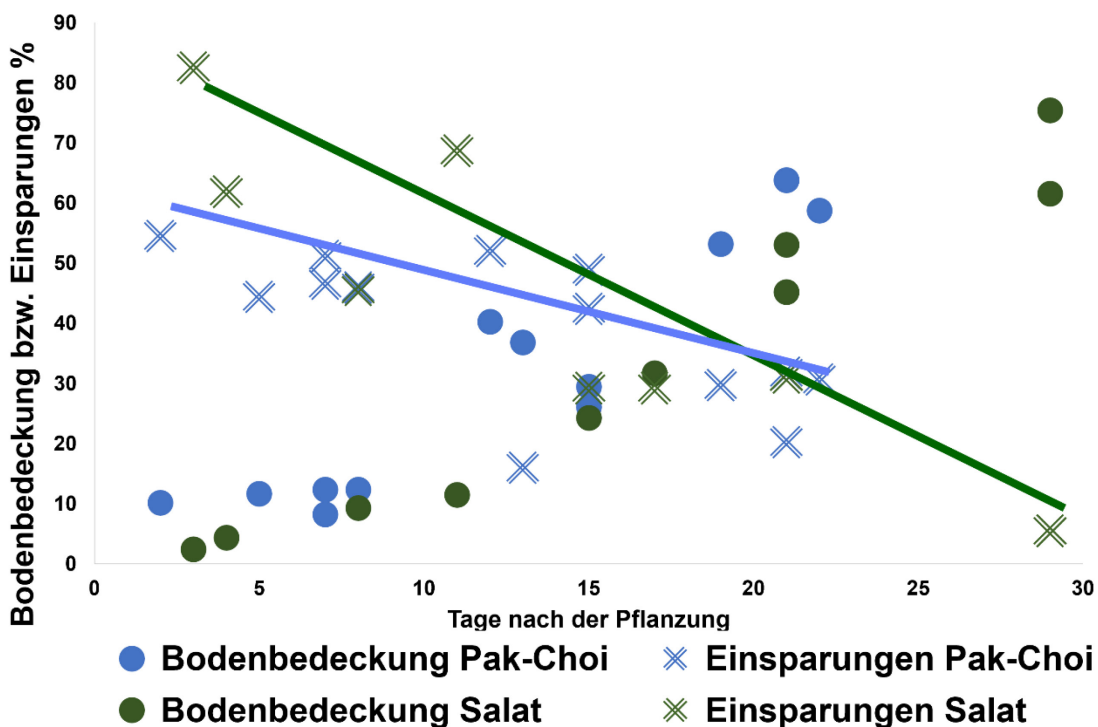


Abbildung 8: Prozentuale Bedeckung des Bodens (Deckungsgrad) durch die Pak-Choi- (blau) und die Salatpflanzen (grün) im Verlauf der Kulturdauer sowie das mit Spotspraying erzielte Einsparpotential im Vergleich zu einer Bandbehandlung.

### 5.4.2 Wirksamkeit gegen Blattläuse

Abbildung 9 zeigt den prozentualen Anteil der befallenen Salatpflanzen je nach Behandlung. Im Durchschnitt waren bei der unbehandelten Kontrolle 49 % der Salatpflanzen befallen. Bei den Behandlungen mit dem Insektizid waren 29 bzw. 30 % der Salatpflanzen befallen und damit deutlich weniger als bei der Kontrolle. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen dem Feldbalken und dem Prototyp.

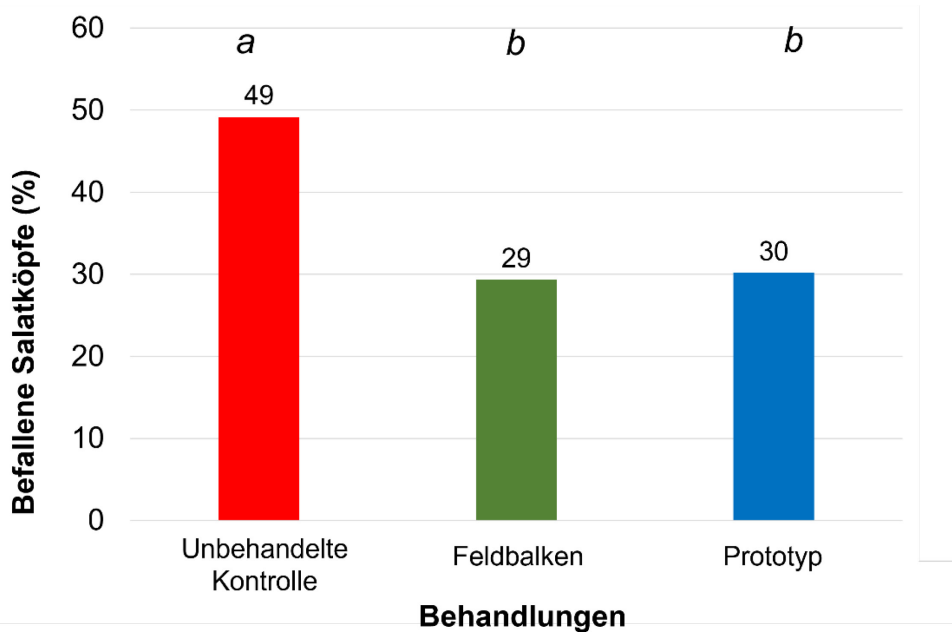


Abbildung 9: Relativer Anteil [%] befallener Salatköpfe in den Verfahren unbehandelte Kontrolle, Feldbalken und Prototyp. Die Wirksamkeit der beiden letzteren Verfahren war vergleichbar.

### 5.4.3 Wirksamkeit gegen Erdflöhe

Die behandelten Pak-Choi Pflanzen wiesen eine deutlich höhere Blattfläche auf als die unbehandelten Pflanzen (durchschnittlich 18 % mehr) (Abbildung 10).

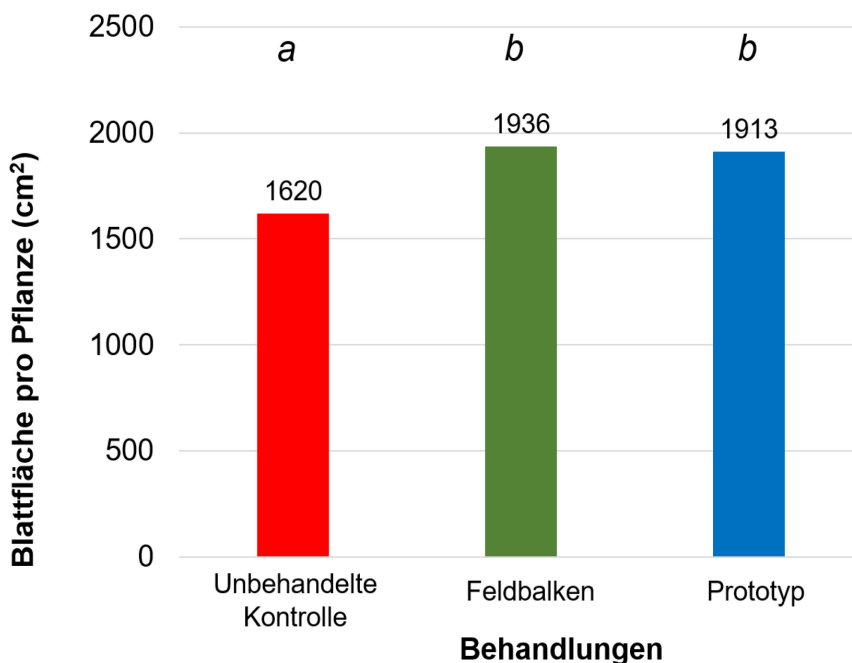


Abbildung 10: Durchschnittliche Blattfläche pro Pak-Choi in den Verfahren unbehandelte Kontrolle, Feldbalken und Prototyp. In den behandelten Varianten konnten sich die Pak-Choi-Pflanzen besser entwickeln.

Mit einem durchschnittlichen Wert von 2 wurden die Schäden bei den behandelten Pflanzen als deutlich geringer bewertet als bei der Kontrolle. Das Entfernen der beschädigten Blätter führte bei der Kontrolle zu einem grösseren Gewichtsverlust als bei den behandelten Pflanzen. Bei all diesen Kriterien wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Behandlungen mit dem Feldbalken und dem Prototyp festgestellt (Abbildung 11).

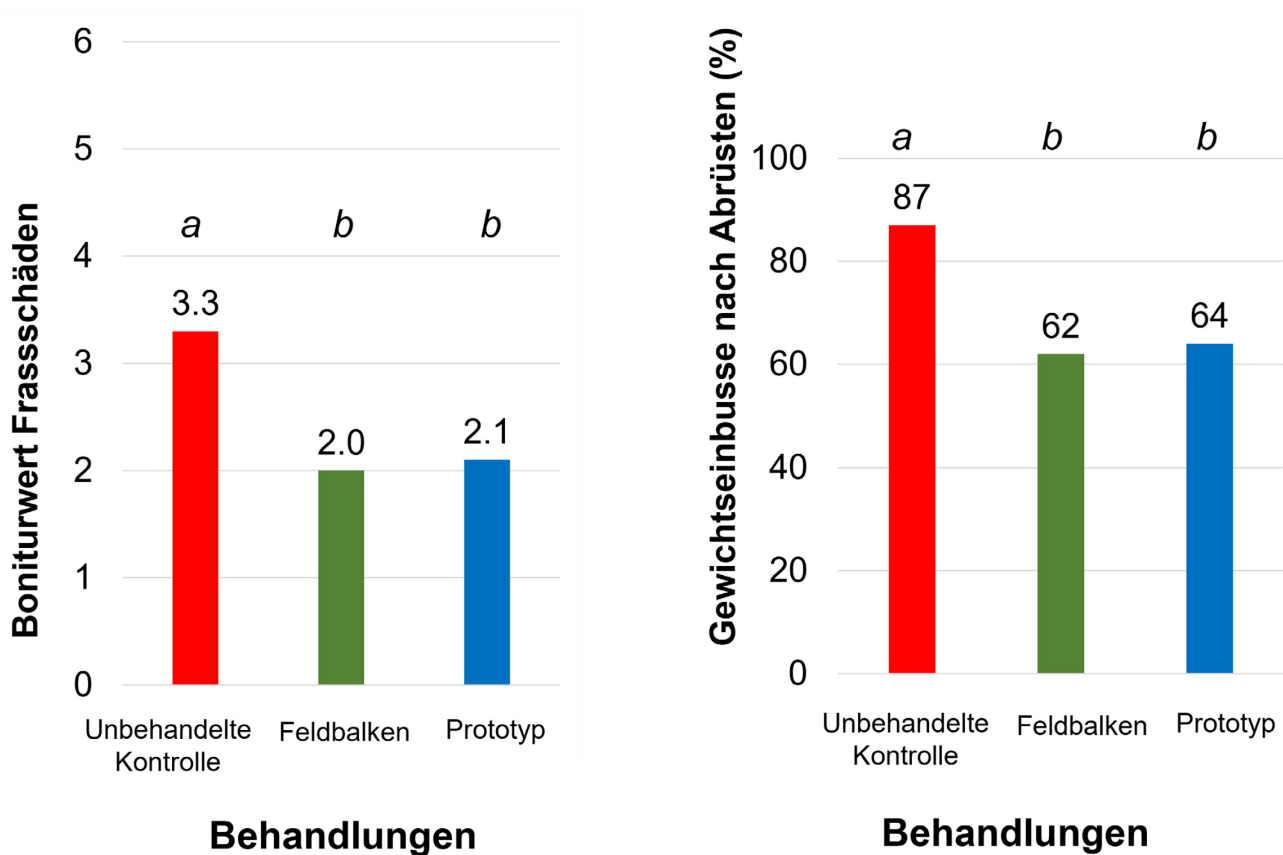


Abbildung 11: Die Frassschäden in den drei Verfahren wurde anhand von einer Boniturskala (1-6) eingestuft (bonitiert). Je höher die Zahl, desto höher der Schaden. In den Pflanzenschutzverfahren wurden signifikant weniger Schäden bonitiert (links). In diesen beiden Verfahren musste auch signifikant weniger abgerüstet werden (rechts).

## 5.5 Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Prototyp die Kulturpflanzen mit grosser Genauigkeit erkennt und sie präzise, einzeln behandelt. Im Vergleich zur Standardausbringung mit 800 l/ha (Standard des Betriebs) betrug die durchschnittliche Einsparung an PSM über die gesamte Kulturdauer 75 % (Salat) und 77 % (Pak-Choi), wobei bei den ersten Behandlungen mehr als 80 % eingespart werden konnten. Trotz dieser deutlichen Reduktion der eingesetzten PSM-Menge unterschied sich, gemessen an einem durchschnittlichen Schädlingsbefall, die Wirksamkeit der Behandlung mit dem Prototyp nicht wesentlich von der Wirksamkeit der Behandlung mit dem Feldbalken.

Die tiefe Fahrgeschwindigkeit und die geringe Arbeitsbreite (siehe auch Kapitel 8.3) könnten die Gemüsebaubetriebe davon abhalten, diese Technologie einzusetzen. Zumindest eine der beiden Grössen sollte daher angepasst werden. Eine Pflanzung mit GPS kann beispielsweise dem Prototyp helfen, die Pflanzen leichter zu lokalisieren.



## 6 Testfahrten und Praxiserfahrungen

Testfahrten wurden ausserdem in gepflanzten Bundzwiebeln, gepflanzter Petersilie und gepflanztem Sellerie durchgeführt.

### 6.1 Testfahrten in gepflanzten Bundzwiebeln (2019)

Die Bundzwiebeln wurden im Abstand von 12 cm gepflanzt. Die Kulturerkennung funktionierte bei diesen engen Pflanzabständen grundsätzlich gut. Dennoch war das Hacken in der Reihe, selbst bei der langsamen Arbeitsgeschwindigkeit von 1.0 bis 1.5 km/h, nicht möglich, da der Abstand zwischen den Pflanzen mit 12 cm zu gering war. Daher wurden die Hackmesser ausgehängt und es erfolgte lediglich eine Überfahrt für eine Spritzbehandlung mit Wasser. Aufgrund der bereits relativ grossen Pflanzen wurde eine 01-Düse (Druck ca. 2.0 bar, Fahrgeschwindigkeit ca. 1.2 km/h) verwendet. Die Benetzung wurde mit wassersensitivem Papier geprüft und war bei dieser Düsendicke gut (Abbildung 12). Aufgrund der geringen Pflanzabstände und des schon grösseren Kulturstadiums entsprach die gezielte Behandlung aber eher einer Bandbehandlung (Spotspraying: 350 l/ha, Bandspritzung: 430 l/ha). Dennoch hätten selbst unter diesen Bedingungen etwas über 50 % an PSM im Vergleich zum Standard-Betrieb (800 l/ha) eingespart werden können. Dies war aber auch auf Lücken im Bestand zurückzuführen.

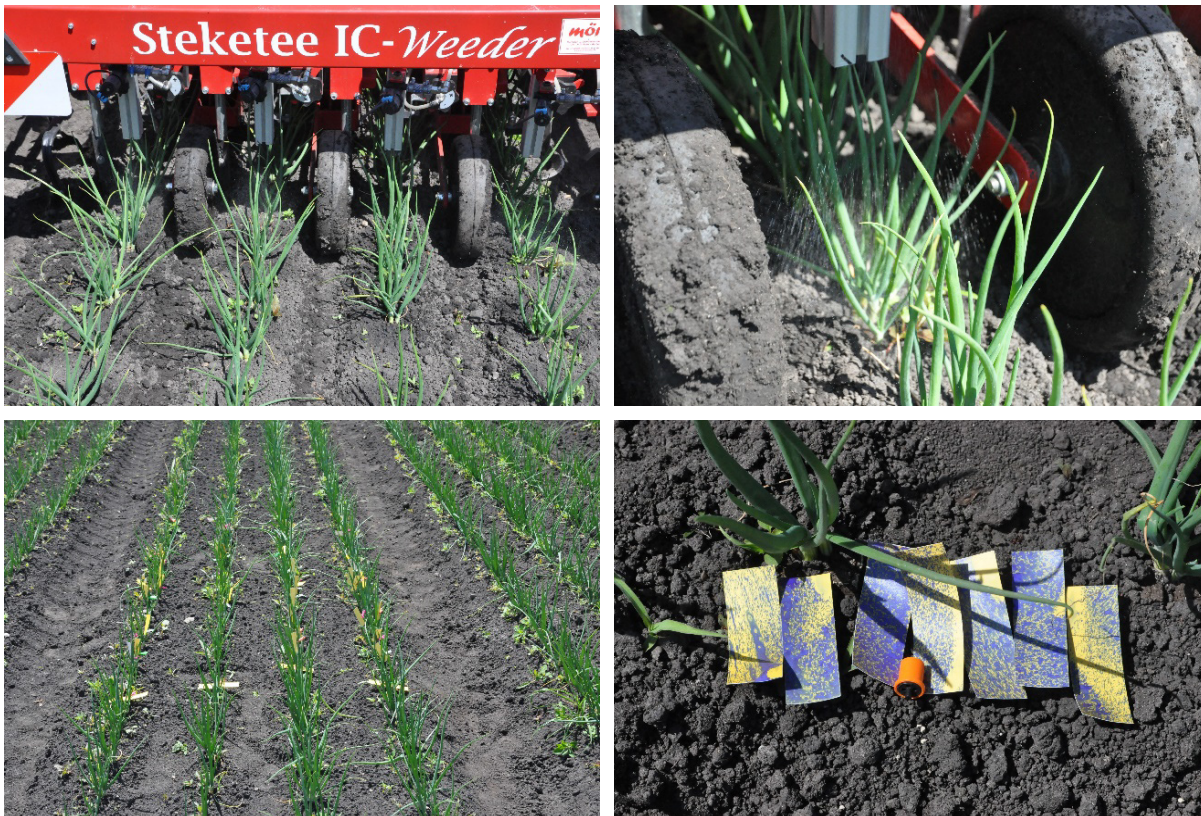


Abbildung 12: Erster Einsatz des PS-Roboters in Bundzwiebeln (oben links und oben rechts). Die Benetzung wurde mit wassersensitivem Papier qualitativ geprüft (unten links). Mit der 01-Düse konnte eine gute Benetzung erzielt werden (unten rechts). Unterschiede zwischen den Papieren ergeben sich aus unterschiedlichen Positionen im Bestand (Spritzschatten).

### 6.2 Testfahrten in gepflanzter Petersilie (2019)

Im Herbst wurde der PS-Roboter in gepflanzter Petersilie eingesetzt. Die Kultur war im Frühjahr gepflanzt und bereits mehrmals geschnitten/geerntet worden. Die Erkennung der Kulturpflanzen funktionierte auch in diesem vor kurzem geernteten Bestand erstaunlich gut (Abbildung 13). Der Boden war jedoch zu stark verkrustet, sodass der Hackerfolg gering war, da die Hackmesser den Boden nicht zu bearbeiten vermochten.



In Petersilie wäre es wichtig, den PS-Roboter von Kulturbeginn an einzusetzen. So wird der Boden regelmässig gelockert, was sich auch positiv auf die nachfolgenden Hackdurchgänge und das Pflanzenwachstum auswirkt. Zwischen einem Schnitt und dem nächsten Einsatz des PS-Roboters muss einige Zeit zugewartet werden. Die Erntereste müssen schon ausreichend verdorrt und zersetzt sein oder sie müssen bei der Ernte entfernt werden, damit die Kulturerkennung wieder gut funktioniert und die Hackmesser nicht durch die Erntereste blockiert werden.



Abbildung 13: Testfahrt des PS-Roboters in gepflanzter, bereits mehrmals geschnittener Petersilie (links). Rechts: Darstellung der von der Kamera «erkannten» Pflanzen (links oben auf dem Display).

### 6.3 Testfahrten in Sellerie (2020)

Im Sommer 2020 wurde der Prototyp ein erstes Mal in Sellerie eingesetzt (Abbildung 14). Die Pflanzenerkennung funktionierte gut, vorausgesetzt die Pflanzen waren nicht zu gross. Zur Abschätzung des Potentials für PSM-Einsparungen wurden bei dieser Kultur Applikationen mit Wasser über 40 m durchgeführt. Die Pflanzen waren im Abstand von 29 cm gepflanzt worden und hatten zum Zeitpunkt des Versuchs einen Durchmesser von 13 cm. Der Prototyp, ausgerüstet mit Bandspritzung-Flachstrahldüsen (Teejet TP 40-01 E, Lechler 45-070, Lechler 75-060 und Lechler 80-01E bei 1.5 und 2.0 bar Druck), wurde mit einer Geschwindigkeit von 1.5 km/h gefahren. Bei diesen Parametern wären bei einer Bandspritzung 370 l/ha ausgebracht worden, d. h. etwa halb so viel wie bei der flächigen Behandlung (800 l/ha) des Landwirts. Mit der Spotspraying-Technologie wurden durchschnittlich 170 l/ha benötigt, was etwa 50 % weniger ist als bei einer Bandspritzung und über 75 % weniger als bei ganzflächiger Behandlung.



Abbildung 14: Erster Einsatz des PS-Roboters in Sellerie. Die ausgebrachte Menge wurde auf einer Beetlänge von 40 m gemessen und daraus das Einsparpotential im Vergleich zum Feldbalken berechnet.

## 6.4 Grenzen der Sensoren und Aktoren



Abbildung 15: Unkräuter in Sellerie. Nahe an den Kulturpflanzen wachsende Unkräuter können nur begrenzt erkannt und durch Hacken entfernt werden.

Keimen Unkräuter nahe an den Kulturpflanzen, kann die eingesetzte Kamertechnologie diese nicht immer von den Kulturpflanzen unterscheiden (Abbildung 15: Hirse in der Mitte des Bildes, Kreuzkraut rechts unten). Ausserdem kann mit den Hackmessern in diesem Fall die Hirse nicht entfernt werden, ohne die Kulturpflanze zu schädigen. Bei der Behandlung mit PSM wird die Hirse einfach mitbehandelt (Überschätzung der Kulturpflanzengrösse). Unkräuter, die zu nah an den Setzlingen wachsen, können mit dem PS-Roboter nicht bekämpft werden. Insgesamt war die Unkrautbekämpfung mit dem PS-Roboter aber sehr wirksam.

## 6.5 Off-target

2018 wurde ein Versuch auf einem Boden durchgeführt, bei dem die behandelte Fläche gut sichtbar war (Abbildung 16). Die Behandlung erfolgte in der ersten Woche nach der Pflanzung und die Salatpflanzen waren entsprechend klein. Der Kulturdeckungsgrad lag bei nur 2 % (Abbildung 17). Mit dem PS-Roboter wurden etwa 10 % der gesamten Fläche behandelt (Abbildung 18). Dies entspricht einer Reduktion von 90 % PSM im Vergleich zum Feldbalken.

Bei der Flächenapplikation mit dem Feldbalken gelangten 2 % des PSM auf die Zielfläche und 98 % auf den Boden (Nicht-Zielfläche). Bei der Behandlung mit dem PS-Roboter war das Verhältnis deutlich besser: 20 % der Brühe auf der Zielfläche und 80 % davon auf der Nicht-Zielfläche. Isoliert betrachtet, erscheint auch dieses Verhältnis noch als ungünstig. Es muss aber beachtet werden, dass

- die Salatpflanzen eine unregelmässige Form aufweisen, die behandelten Einzelflächen hingegen Rechtecke sind.
- die Düsen- sowie Programmeinstellungen so gewählt werden müssen, dass jede Pflanze vollständig behandelt wird (Pflanzenschutzwirkung). Aufgrund der Variabilität im Feld (Pflanzungenauigkeit, variierende Grösse der Pflanzen) muss daher ein gewisser Puffer eingeplant werden.
- diese Applikation für den PS-Roboter «worst case» war bezüglich des Verhältnisses von Zielfläche zu Nicht-Zielfläche. Bei etwas grösseren Pflanzen wird das Verhältnis deutlich besser.





Abbildung 16: Mit dem PS-Roboter behandelte Salatsetzlinge (erste Woche nach der Pflanzung).

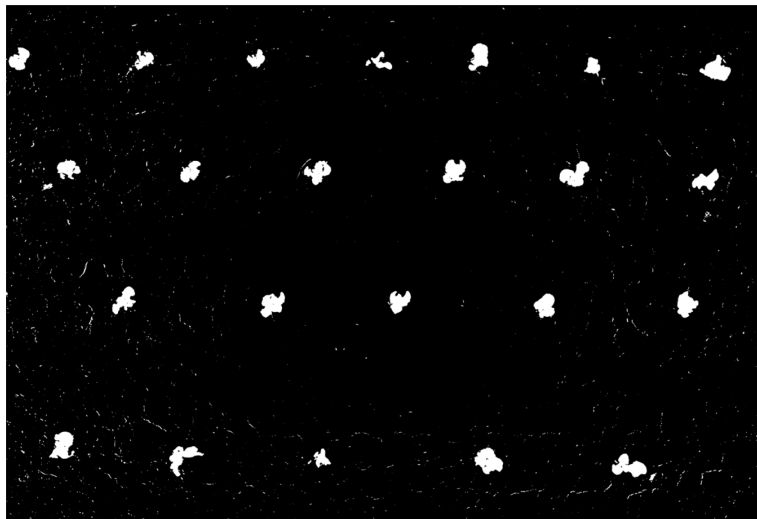


Abbildung 17: Der Kulturdeckungsgrad beträgt zu diesem Zeitpunkt 2 % (Berechnungsmethode: Rasmussen et al., 2007, Weed Research 47)

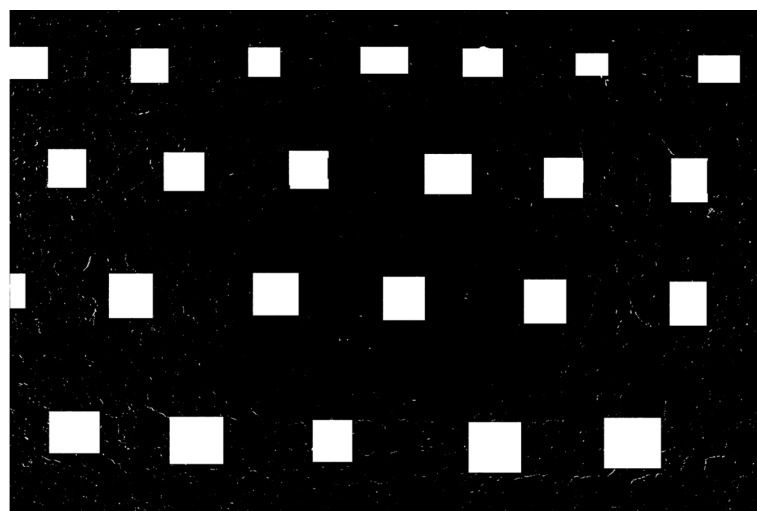


Abbildung 18: Behandelt wurden circa 10 % der Fläche. Dies entspricht einer Einsparung von 90 % im Vergleich zum Feldbalken.

## 7 Dosierschema

### 7.1 Entwicklung eines Dosierschemas

Eines der Hindernisse bei der Verwendung der Spotspraying-Technik ist die Schwierigkeit, die genaue Brühmenge zu bestimmen. Dieses Volumen hängt im Gegensatz zur flächigen Applikation mit dem Feldbalken zusätzlich von der Grösse der Pflanzen (vertikal projizierte Fläche) und der Pflanzdichte ab. Um die Abschätzung des Volumens der zuzubereitenden Brühmenge zu erleichtern und damit die Verwendung des Prototyps zu vereinfachen, wurde ein Dosierschema auf der kostenlosen Software Google Sheets (Google LLC, USA) entwickelt. Diese ist auf Computer und Smartphone nutzbar.

Vor der Behandlung muss der Anwender Messungen auf dem Feld vornehmen und Eingaben machen:

- Durchmesser und Höhe der Pflanzen  
(Im Jahr 2020 zeigten etwa hundert Messungen des Pflanzendurchmessers pro Kultur (Batavia-Salat, Eichblattsalat, Lollo-Salat, Chinakohl, Pak-Choi und Zuckerhut), dass statistisch gesehen eine Stichprobe von 20 Pflanzen ausreicht, um den durchschnittlichen Durchmesser einer Pflanze mit 95%iger Genauigkeit auf einen Zentimeter genau zu schätzen. Um die durchschnittliche Höhe verlässlich zu bestimmen, reicht eine kleinere Stichprobe aus.)
- Pflanzenzahl in zwei Reihen über eine Distanz von ca. 5 Metern
- Anzahl der zu behandelnden Beete
- Länge der zu behandelnden Parzelle
- Gewünschte Sicherheitszuschläge in der Länge und Breite, die vor, nach und an den Seiten jeder Pflanze zu behandeln sind, um eine gute Abdeckung der Pflanze durch die Behandlung zu gewährleisten
- Volumen der Brühmenge pro Hektar, das normalerweise auf dem Feld ausgebracht wird, um die Konzentration der zuzubereitenden Produkte zu berechnen
- Bewilligte Produktmengen pro Hektar
- Auswahl des Düsentyps und dessen Einsatzdrucks für die Behandlung aus einer vordefinierten Liste  
(Zuvor sind Labor- und Feldmessungen erforderlich, um die Strahlbreite in Abhängigkeit von der Höhe und dem Druck der Düse zu bestimmen. Zurzeit kann das Programm die Prototyp-Einstellungen für Behandlungen mit einem der folgenden vier Düsentypen berechnen: Lechler 45-070, Lechler 75-060, Lechler 80-01E und Teejet TP 40-01 E.)

Mit diesen Daten kann das Programm die folgenden Parameter berechnen:

- Die benötigte Wassermenge
- Die benötigte Produktmenge
- Die über dem Boden einzustellende Düsenhöhe
- Die Mindestfahrgeschwindigkeit, um eine Überschreitung des Grenzwerts für Rückstände pro Pflanze auszuschliessen

### 7.2 Genauigkeit der versprühten Brühmengen

Wurden die auszubringenden Brühmengen mit Hilfe des Dosierschemas vorausberechnet, konnten mehr oder weniger grosse Unterschiede zwischen den effektiv versprühten und den vorausgerechneten Brühmengen festgestellt werden. Um die Signifikanz dieser Variationen zu bestimmen, wurden 43 Behandlungsversuche bei verschiedenen Pflanzkulturen durchgeführt (17 an Pak-Choi, 16 an Lollo-Salat, 4 an Kopfsalat, 4 an Eichblattsalat und 2 an Batavia-Salat). Die Kulturen wurden in Dichten von 90'000 bis 130'000 Pflanzen/ha gepflanzt und befanden sich in Kulturstadien von BBCH 15 (5 Blätter entfaltet) bis 48 (der Kopf hat 80 % seiner endgültigen Grösse erreicht). Jede Behandlung wurde auf einem 40 m langen und 1.5 m breiten Beet mit jeweils vier Pflanzenreihen durchgeführt. Die erste Behandlung fand am 30. Juni 2020 und die letzte am 15. September 2020 statt.

Die Behandlungen mit Wasser erfolgten bei verschiedenen Geschwindigkeiten von 0.9 bis 1.6 km/h und mit Bandspritzung-Flachstrahldüsen (Teejet TP 40-01 E, Lechler 45-070, Lechler 75-060 und Lechler 80-01E). Die Durchflussmengen reichten von 0.19 bis 0.32 l/min.



### 7.2.1 Datenerfassung

Bei allen Versuchen wurde das von den vier Düsen versprühte Wasservolumen gemessen. Auf jedem Beet wurden alle Pflanzen gezählt und der Durchmesser pro Pflanze von mindestens 30 Pflanzen bestimmt. Die Behandlungslänge (cm) im Bereich der Pflanze wurde mit wassersensitivem Papier an ca. 350 Pflanzen bestimmt. Diese Messung wurde vor dem Stadium BBCH 47 durchgeführt, bei welchem der Kopf 70 % seiner endgültigen Größe erreicht hatte (Abbildung 19). Die vom Prototyp angezeigte Fahrgeschwindigkeit wurde durch Messen der Behandlungsdauer in 20 Versuchen überprüft. Die Durchflussmengen pro Düse entsprechend der eingestellten Drücke wurden an jedem Behandlungstag für zwei Minuten im Stillstand überprüft, was gesamthaft mehr als 150 Messungen entspricht.



Abbildung 19: Überprüfung der Qualität der Behandlung von Pak-Choi mit wassersensitivem Papier. Der Durchmesser der Pflanze wird mit der Länge der Behandlung pro Pflanze verglichen, um die Genauigkeit der behandelten Flächen zu bestimmen.

### 7.2.2 Ergebnisse

In allen Versuchen erkannte die Kamera die Kulturpflanzen und unterschied diese von Unkräutern. Bei der Überprüfung von mehr als 350 Einzelpflanzenspritzungen wurde jede einzelne Pflanze exakt und vollständig besprüht. Die Messungen der Fahrzeiten pro Versuch und der Durchflussmengen pro Düse ergaben, dass der Prototyp auch Geschwindigkeit und Düsenausgangsdrücke zuverlässig einstellt. Tatsächlich ist die Variabilität der gemessenen Werte gering und die durchschnittlichen Fehler betragen nur zwischen 5 und 7 %.

Es ist zu beachten, dass die Abweichung zwischen der behandelten Länge und dem Durchmesser pro Pflanze im Durchschnitt nur 2 % beträgt. Gemäss den vorliegenden Erfahrungen würde der Prototyp ein bestimmtes Volumen mit mehr als 70 % Zuverlässigkeit auf eine Pflanze mit einem Pflanzendurchmesser von weniger als 15 cm oder mit einem Abstand von mehr als 7 cm zwischen den Pflanzen sprühen. Mit einem Korrelationswert von  $r^2 = 0.82$  scheint die Bedeutung des Abstands zwischen den Pflanzen gegenüber dem Durchmesser zu überwiegen.

## 7.3 Fazit

Im geplanten Einsatzbereich – junge Kulturstadien – stimmte die vorgängig berechnete Brühmenge ausreichend genau mit der danach tatsächlich ausgebrachten Menge Brühmenge überein. Das bedeutet, dass der Prototyp funktioniert und die einzelnen Kulturpflanzen in jungen Kulturstadien präzise behandelt werden, und dass die benötigte Brüh- bzw. auch PSM-Menge anhand des Dosierschemas ausreichend genau berechnet werden kann.

## 8 Arbeitswirtschaftliche Aspekte

### 8.1 Arbeitszeitbedarf

Die Fahrgeschwindigkeit und die Arbeitsbreite des Prototyps liegen deutlich unter denen von konventionellen Verfahren. Diese beiden Kenngrößen haben erheblichen Einfluss auf den Arbeitszeitbedarf und damit auf die Wirtschaftlichkeit einer Technologie. Im Fokus der arbeitswirtschaftlichen Untersuchungen stand deshalb der modellbasierte Vergleich zwischen der neuen digitalen Technologie für kombinierte Hack- und Pflanzenschutzarbeiten und der herkömmlichen mechanischen Unkrautbekämpfung mit einem konventionellen Hackgerät, wie die in der Praxis verbreiteten Scharhackgeräte mit halbstarren oder flexiblen Zinken für die Bearbeitung zwischen den Reihen. Ziel der Untersuchung war es aufzuzeigen, welchen Spielraum es gibt, um die Flächenleistung zu beeinflussen sowie Erkenntnisse zu gewinnen über die Arbeitsweise der Anwenderinnen und Anwender mit einer neuen digitalen Technologie.

### 8.2 Methoden der Datenerfassung und Modellkalkulation

Für die Studien zur Analyse der zeitlichen Arbeitsbelastung wurden Arbeitsbeobachtungen in Form von Videoaufnahmen während der Arbeitserledigung resp. den Feldüberfahrten mit dem Prototyp erstellt. Die Arbeitsbeobachtung zählt zu den kausalen arbeitswirtschaftlichen Erfassungsmethoden. Diese Methoden basieren auf direkten Messungen oder auf Versuchen und eignen sich insbesondere für Ist-Analysen, Planzeiterstellungen und Soll-Ist-Vergleiche. Die Termine für die Zeitstudien ergaben sich aus den von Betriebsleiter T. Wyssa (Wyssa Gemüse, Galmiz) als geeignet eingestuften Zeitpunkten zur Kulturbehandlung. Die Videoaufnahmen wurden mit der spezialisierten Software für Zeitstudien MEZA (Fa. DRIGUS Systeme GmbH Dortmund, Deutschland) ausgewertet. Die Zeitstudien wurden in Form von Einzelzeitmessungen mit genau definierten Anfangs- und Endpunkten durchgeführt (gemessen in  $\text{cmin} = 1/100 \text{ min}$ ). Die Erfassung der Arbeitszeiten erfolgte auf Arbeitselementebene (Standardmethode nach REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.), Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Band 1, Carl Hanser Verlag München, 1978).

Die aufbereiteten Daten sämtlicher Zeitstudien wurden geordnet nach Arbeitselementen in Form von Tabellenblättern zusammengefasst. Die entsprechenden Planzeiten für jedes Arbeitselement wurden in der Arbeitselementdatenbank von Agroscope fortgeschrieben und standen anschliessend für die Modellierung des Arbeitszeitbedarfs unterschiedlicher Verfahrensvarianten in einem Modellkalkulationssystem (M. Schick, Dynamische Modellierung landwirtschaftlicher Arbeit unter besonderer Berücksichtigung der Arbeitsplanung, Ergonomia Verlag Stuttgart, 2006, 144 S.) zur Verfügung. Das Arbeitsablaufmodell für das konventionelle Hacken wurde als Grundlage verwendet und mit den neu erhobenen Arbeitselementen modifiziert. Mit dem auf das kameragesteuerte Hacken angepassten Modell konnten u.a. Zeitarten, Einflussfaktoren und Leistung analysiert werden.

Für die Modellierung des Arbeitszeitbedarfs wurde eine 1 ha grosse Parzelle definiert (Abbildung 20). Als Systemgrenze wurde der Feldrand festgelegt. Rüstzeiten auf dem Hof, wie beispielsweise das Anbauen des Gerätes, wurden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Weitere Annahmen sind in Tabelle 2 dargestellt.

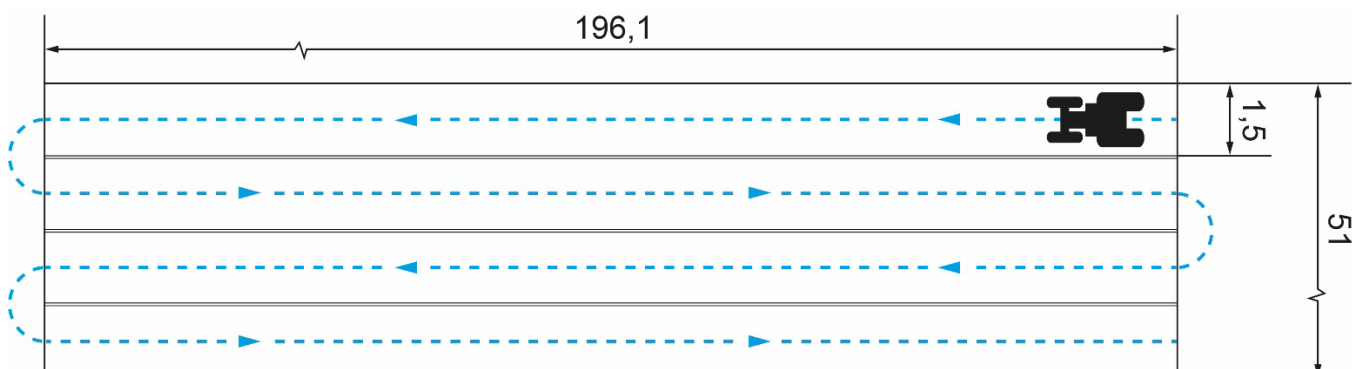


Abbildung 20: Skizze standardisierte Parzelle [m], Fläche 1 ha.

**Tabelle 2:** Modellannahmen für die arbeitswirtschaftlichen Kalkulationen

Parameter	Wert
Parzellengröße [ha]	1
Parzellenlänge [m]	196.1
Parzellenbreite [m]	51
Theoretische Arbeitsbreite [m]	1.5
Anzahl Reihen [n]	34
Fahrstrecke [m]	6667.4
Anzahl Wendevorgänge [n]	33

### 8.3 Ergebnisse

**Arbeitszeitbedarf:** Zunächst wurde der jeweilige Arbeitsablauf für die Varianten «PS-Roboter» (Prototyp) und «Scharhackgerät» miteinander verglichen (Abbildung 21). Wie zu erwarten, ergibt sich der wesentliche Unterschied durch die Ausführungszeit, die wiederum hauptsächlich von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst wird (siehe unten).

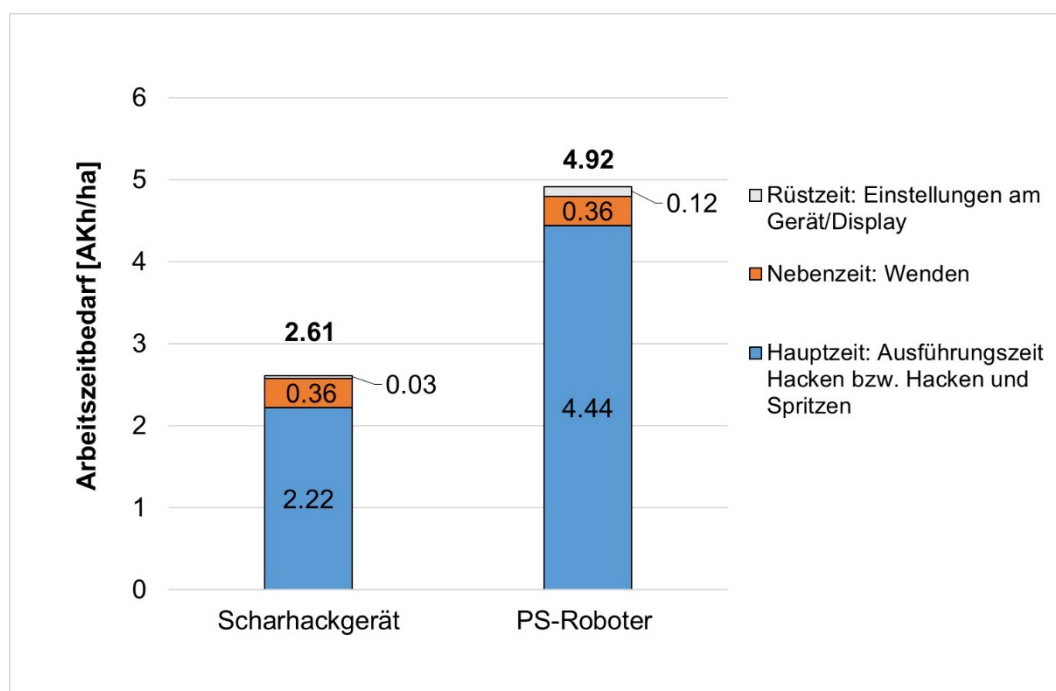


Abbildung 21: Vergleich des Arbeitszeitbedarfs für Unkrautregulierung zwischen einem konventionellen Scharhackgerät (Arbeitsbreite: 1.5 m, Fahrgeschwindigkeit: 3 km/h) und dem PS-Roboter (Arbeitsbreite: 1.5 m, Fahrgeschwindigkeit: 1.5 km/h) unter Berücksichtigung der Zeitarten (standardisierte Parzelle).

Der Gesamtarbeitszeitbedarf beträgt für den Prototyp 4.92 AKh/ha, für das Scharhackgerät knapp die Hälfte mit 2.61 AKh/ha. Für das Hacken selber wird aufgrund der Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h beim Scharhackgerät halb so lange gebraucht wie beim Prototyp bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1.5 km/h. Die Nebenzeit für das Wenden bleibt aufgrund derselben Arbeitsbreite von 1.5 m bei beiden Geräten gleich, wirkt sich aber nur geringfügig auf den Gesamtarbeitszeitbedarf aus. In den Rüstzeiten ist bei der Variante «PS-Roboter» u.a. berücksichtigt, dass bei Arbeitsbeginn zwei AK zugegen sind, um die Einstellungen vorzunehmen. Eine Person befindet sich auf dem Traktor, eine weitere Person beim Prototyp. Dies und die zusätzlich benötigte Arbeitszeit für die Einstellungen am Display können jedoch auf die Gesamtzeit betrachtet, vernachlässigt werden. Mit dem Prototyp wird eine Arbeitsleistung von 0.21 ha/h erreicht im Vergleich zu 0.38 ha/h mit der Variante «Scharhackgerät».

**Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf den Arbeitszeitbedarf:** Mittels Zeitstudie ist es möglich zu überprüfen, ob die im Display angezeigte Fahrgeschwindigkeit über längere Strecken realisiert werden kann. Hierfür wurde die Zeit für das Arbeitselement «Hacken» bzw. «Hacken/Spritzen» der jeweiligen gefahrenen Strecke in Metern zugeordnet. In Abbildung 22 ist dargestellt, welche Geschwindigkeiten in den unterschiedlichen Kulturen erreicht wurden und wie sie sich auf den Arbeitszeitbedarf je Hektare auswirken.

Mit einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit von 0.5 auf 1.0 km/h kann der Arbeitszeitbedarf um 49 % gesenkt werden, mit einer Erhöhung von 1 auf 2 km/h sind es 46 %. Störungen sind in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

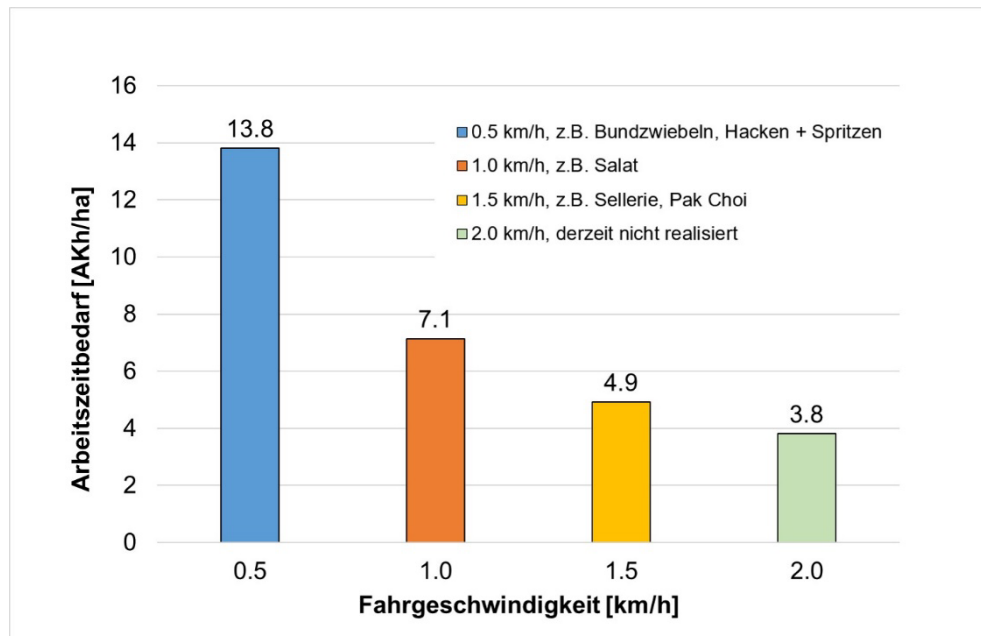


Abbildung 22: Vergleich des Arbeitszeitbedarfs mit dem PS-Roboter bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (Arbeitsbreite: 1.5 m, standardisierte Parzelle).

**Einfluss der Arbeitsbreite auf den Arbeitszeitbedarf:** Auch die Arbeitsbreite hat einen direkten Einfluss auf den Arbeitszeitbedarf (Abbildung 23). Mit der Erweiterung der Arbeitsbreite von einem auf zwei Beete bzw. drei Beete beträgt das Einsparungspotential hinsichtlich des Arbeitszeitbedarfs je Hektare 49 % bzw. 65 %.

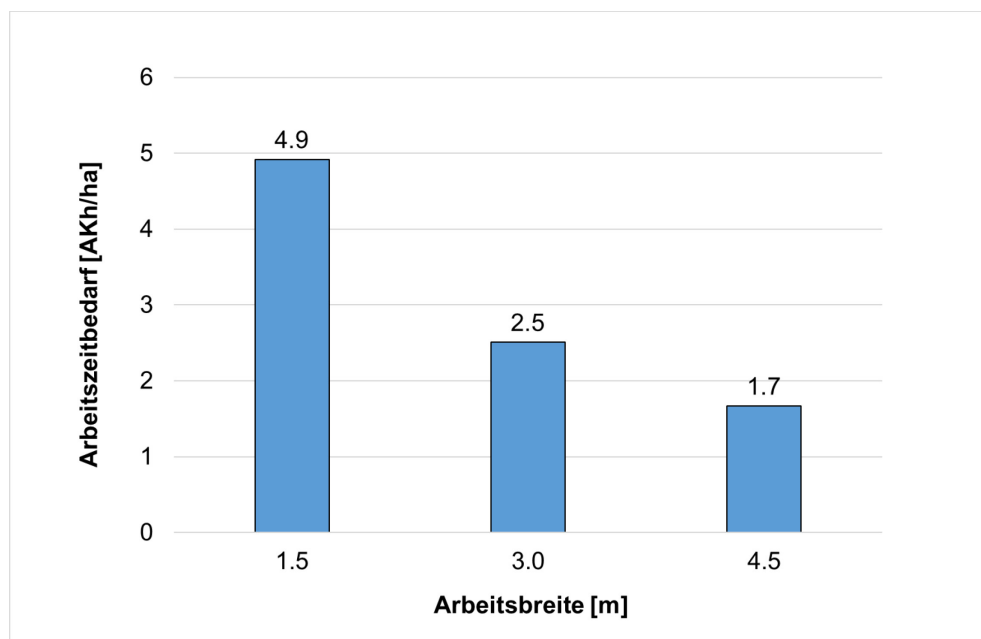


Abbildung 23: Vergleich des Arbeitszeitbedarfs für Unkrautregulierung mit dem PS-Roboter bei unterschiedlichen Arbeitsbreiten (Fahrgeschwindigkeit: 1.5 km/h, Parzellengröße 1 ha).

**Störungen:** Während der Zeitstudien konnten neben den planmässigen Arbeitsabläufen auch verschiedene Arten von Störungen beobachtet werden, die am Ende der Projektdauer mit dem Betriebsleiter diskutiert wurden. Zwei Beispiele sollen hier erwähnt werden:

Bei der Überfahrt einer nassen Stelle auf dem Feld wurde das Hackgerät nicht rechtzeitig ausgehoben. In der Folge löste sich eine Schar und fiel ab. T. Wyssa berichtete, dass es ab und zu vorkam, dass sich Teile lösten. Die Ursache war, dass beim Prototyp im Projektverlauf nachträglich Elemente modifiziert und angeschraubt wurden. Durch die Vibrationen haben sich öfters Schrauben gelöst. Einige Elemente könnten zukünftig auch angeschweisst werden.

Bei einer anderen Zeitstudie wurden Kulturpflanzen beim Hacken ausgerissen. Die Ursache war ein defektes Druckluftventil, welches sich zugesetzt hatte. Dadurch haben sich die Messer nicht zum richtigen Zeitpunkt geschlossen. Dies muss von der Arbeitsperson rechtzeitig bemerkt werden, damit es nicht zu grösseren Verlusten kommt.

**«Display bedienen» - Umgang mit digitaler Technologie:** Im Hinblick auf die Adaption einer digitalen Technologie haben wir das Bedienen des Displays als Referenzverfahren genauer betrachtet (Abbildung 24). Monitore, mit denen beispielsweise Fahrerassistenzsysteme in Traktoren überwacht werden, haben bereits vor 20 Jahren Einzug in die Fahrerkabinen gehalten. Uns interessierte, wie Anwenderinnen und Anwender mit dieser Technologie umgehen. In den Zeitstudien konnten wir vier verschiedene Personen bei der Bedienung beobachten, mit zwei Personen haben wir zusätzlich Interviews geführt. Die Zeitstudien haben gezeigt, dass die Häufigkeit und Dauer, mit der das Display während der Arbeit bedient resp. die Informationen abgelesen wurden, im Projektverlauf abgenommen haben. Zudem konnte festgestellt werden, dass erfahrene Arbeitspersonen seltener und kürzer auf den Monitor schauen, um die Funktionen zu überwachen. Eingewöhnung und Übung haben also eine Bedeutung für den Umgang mit digitaler Technologie. Auch der sprachliche Aspekt spielt eine Rolle. Wir konnten beobachten, dass eine nicht deutschsprachige Arbeitsperson trotz der Piktogramme Mühe mit den Einstellungen hatte und sich der Arbeitsbeginn durch die Einstellphase verzögerte. Für die Bediensoftware sind verschiedene Sprachen verfügbar, die Umstellung auf eine andere Sprache kann aber derzeit nicht auf dem Traktor, sondern nur am PC im Büro vorgenommen werden.



Abbildung 24: Das Display enthält neben dem Fenster für die Überwachung der Bildanalyse (hier schwarzer Bereich, vgl. Abb. 13) zahlreiche Bedienfunktionen, die mit Piktogrammen bezeichnet sind.



## 9 Betriebswirtschaftliche Aspekte

Um die neue digitale Technologie auch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewerten zu können, wurde eine Analyse auf Basis einer Teilkostenkalkulation durchgeführt. Hierfür wurde die Produktion von Kopfsalat im Freiland als Fallbeispiel ausgewählt.

### 9.1 Kalkulationsgrundlagen

Für die Teilkostenrechnung Pflanzenschutz (Bekämpfung von Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen) wurde eine Standardstrategie mit der Strategie «PS-Roboter» verglichen. Die Strategien unterscheiden sich wie folgt:

<b>Standard</b> (Behandlungen mit der Anbaufeldspritze)				
Vor der Pflanzung	Nach der Pflanzung	10 Tage nach Pflanzung	19 Tage nach Pflanzung	8 Tage vor der Ernte
<i>Herbizide</i>		<i>von Hand jäten 30 Akh/ha</i>		
Stromp Aqua 2 l/ha	Kerb Flo 3.75 l/ha	<i>eine Fahrt mit Scharhacker</i>		
		<i>Fungizide gegen Falschen Mehltau, Botrytis und Sclerotinia</i>		
		Previcur Energy 2 l/ha Espiro 2 l/ha	Revus 0.6 l/ha	Revus 0.6 l/ha
		<i>Insektizide gegen Blattläuse, Thripse und Raupen</i>		
		Movento SC 0.75 l/ha Karate Zeon 0.1 l/ha	Movento SC 0.75 l/ha Audienz 0.2 l/ha	Karate Zeon 0.1 l/ha Dipel DF 0.6 l/ha
<b>PS-Roboter</b> (bei den ersten beiden Behandlungen mit dem PS-Roboter wird gleichzeitig gehackt, die dritte Behandlung wird mit der Feldspritze durchgeführt)				
Vor der Pflanzung	Nach der Pflanzung	10 Tage nach Pflanzung*	19 Tage nach Pflanzung*	8 Tage vor der Ernte*
		<i>Fungizide gegen Falschen Mehltau, Botrytis und Sclerotinia</i>		
		Previcur Energy 0.38 l/ha Espiro 0.38 l/ha	Revus 0.18 l/ha	Revus 0.6 l/ha
		<i>Insektizide gegen Blattläuse, Thripse und Raupen</i>		
		Movento SC 0.14 l/ha Karate Zeon 0.02 l/ha	Movento SC 0.225 l/ha Audienz 0.06 l/ha	Karate Zeon 0.1 l/ha Dipel DF 0.6 l/ha
* 10 Tage nach der Pflanzung können mit dem PS-Roboter 81 % an Pflanzenschutzmitteln eingespart werden , 19 Tage nach Pflanzung 70 %, kurz vor der Ernte deckt der Salat so viel Boden ab, dass fast kein Pflanzenschutzmittel mehr eingespart werden kann und daher die Behandlung mit der Anbaufeldspritze erfolgt.				

Eigene Darstellung in Anlehnung an Agroline Pflegestrategie Kopfsalat 2022

Bei dieser Teilkostenrechnung werden nur der Pflanzenschutz und die mechanische Unkrautbekämpfung berücksichtigt (Tabelle 3). Letztere ist Teil der Kulturpflege (siehe Tool Proficost der Schweizer Zentralstelle für Gemüsebau SZG 2022). Es gilt die Annahme, dass der Wechsel der Strategie für die Unkrautregulierung und den Pflanzenschutz (von der Standardstrategie zum PS-Roboter) keine Unterschiede bezüglich Düngeanforderungen bzw. bezüglich Ertrag und Erlös verursacht. Dies ist plausibel, da in den durchgeführten Wirksamkeits- und PSM-Einsparungs-Ver-suchen die Erträge bezüglich Menge und Qualität im Verfahren «PS-Roboter» nicht vom Verfahren «Standard» ab-wichen.

Die Produktionskosten für 1 ha Kopfsalat im Freiland mit der Standardstrategie wurden mithilfe der Vollkostenkalku-lationssoftware «Proficost» (SZG, 2022) berechnet.

Anhand des Beispiels Kostenersparnis bzw. Kostenerhöhung pro Salatkopf soll Produzenten, Konsumenten bzw. Abnehmern anschaulich aufgezeigt werden, wie sich diese Art der umweltschonenderen Produktion (PS-Roboter) auf die Kosten auswirkt.

**Tabelle 3:** Modellannahmen für die betriebswirtschaftlichen Kalkulationen

Varianten	Standard	PS-Roboter
Anzahl Durchgänge Spritze [n]	5 Spritzdurchgänge Die Herbizide werden solo ausgebracht, vor Pflanzung und nach Pflanzung (2 Überfahrten). Insektizide und Fungizide werden in Tankmischung ausgebracht (3 Überfahrten).	3 Spritzdurchgänge Keine Behandlung mit Herbiziden nötig, da in und zwischen der Reihe gehackt wird. 2 Fahrten mit dem PS-Roboter zum Hacken und Spritzen 1 Überfahrt mit der Feldspritze (letzte Behandlung, wenn der Salat, den Boden nahezu abdeckt und somit Einsparpotential zu tief ist).
Anzahl Durchgänge Hacke [n]	Einmal Hacken mit Scharhacker Dreimal von Hand jäten	Das präzise Hacken ersetzt auch diese beiden Arbeiten.
Flächenleistung [ha/h]	2.53 (Spritzen) 0.5 (Scharhacker)	0.21
Arbeitskosten [Fr./ha]	27.10	27.10
Traktorkosten [Fr./ha]	43	43
Maschinenkosten [Fr./ha] (ohne Traktorkosten)	49 (Anbaufeldspritze 12 m Balken, 600 l Fass) 84 (Scharhacker 4-reihig)	513
Auslastung [ha]*	50 (Anbaufeldspritze) 30 (Scharhacker)	40

\*mit «Auslastung» ist die behandelte Fläche multipliziert mit der Anzahl Fahrten gemeint.

Quelle: Eigene Darstellung mit Arbeitskosten und Auslastung der SZG 2022 (Proficost) und Kostenkatalog Agroscope (2022)

## 9.2 Weitere Annahmen und verwendete Werte

Die Flächenleistung wurde aus den arbeitswirtschaftlichen Untersuchungen abgeleitet und orientiert sich am höchsten bisher realisierten Wert von 0.21 Hektaren pro Stunde mit dem PS-Roboter. Dabei wurde angenommen, dass die Arbeitsleistung auf dem Feld gleich gross ist, wenn gehackt und behandelt wird, wie wenn nur gehackt wird. Der PS-Roboter ist etwa halb so schnell wie ein Scharhackgerät, das nur zwischen den Reihen hackt. Mit einer Flächenleistung von 0.21 ha/h können pro Tag rund 2 ha bearbeitet werden. Dabei wurde von einem Arbeitstag mit knapp zehn Stunden ausgegangen, was auf Gemüsebetrieben in den Sommermonaten der Realität entspricht.

In der Praxis wird von Mai bis Ende August pro Monat rund fünfmal gehackt (auf einem Betrieb ca. einmal pro Woche). Wenn während vier Monate jeweils fünfmal pro Monat gehackt wird, dann können insgesamt 40 ha mit dem PS-Roboter bewirtschaftet werden. Während des Hackens behandelt der PS-Roboter auch die Kulturpflanzen mit Fungiziden und Insektiziden. Die Auslastung des PS-Roboters beträgt somit 40 ha pro Jahr. Wenn der PS-Roboter beispielsweise pro Salatsatz zweimal eingesetzt wird, können damit 20 ha mit dem Prototyp gepflegt (behandelt und gehackt) werden.

Der Anschaffungspreis des Prototyps wurde in Absprache mit H. Möri (Möri Kartoffel- und Gemüsebautechnik AG, Spins/Aarberg) abgeschätzt. Dies entspricht dem Preis, bevor es zu Problemen bei den Lieferketten und den damit verbundenen Preissteigerungen kam.

Die Maschinenkosten der Anbaufeldspritze und des Scharhackers (Tabelle 4) stammen aus dem Kostenkatalog von Agroscope (Gazzarin et al., 2022). Die Angaben zur Leistung der Anbaufeldspritze stammen von T. Wyssa (Wyssa Gemüse, Galmiz). Es wurde geschätzt, dass die Reparaturkosten für den PS-Roboter rund viermal höher sind als für einen Scharhacker (Möri Kartoffel- und Gemüsebautechnik AG, Spins/Aarberg).

**Tabelle 4:** Modellannahmen Maschinenkosten Prototyp (Quelle: Kostenkatalog 2022; Anschaffungspreis Prototyp, H. Möri)

	Prototyp	
<b>Leistung [ha/h]</b>	<b>0.21</b>	
Anschaffungspreis [Fr.]	135'000	
<b>Auslastung pro Jahr [ha]</b>	<b>40</b>	
Abschreibungszeit [a]	10	
Technische Nutzungsdauer [ha]	500	
Auslastungsgrad [%]	80	
Restwert [Faktor]	0.1	
Belastungsgrad Motor [%]	0.6	
Reparatur- Unterhaltsfaktor RUF [Faktor]	0.6	
Gebäudebedarf [m <sup>3</sup> ]	25	
Verwaltungs- und Risikozuschlag [%]	10	
Weitere Zuschläge [%]	0	
<b>Kostenberechnung in Fr.</b>	<b>pro Jahr</b>	<b>pro Hektare</b>
Abschreibung	13'500	
Zinskosten	1'296	
Gebäudekosten	150	
Versicherungen und Gebühren	150	
<b>Total Fixe Kosten</b>	<b>15'096</b>	<b>377</b>
Reparaturen und Unterhalt		165
Treibstoff		-
Hilfsstoffe		-
<b>Total Variable Kosten</b>		<b>165</b>
Entschädigungsansatz netto (ohne Zuschläge) [Fr./ha]		542
Entschädigungsansatz inkl. Zuschläge [Fr./ha]		<b>596</b>
Entschädigung [Fr./h]		<b>125</b>

Die Annahmen bezüglich Leistung und Auslastung wirken sich sehr stark auf die Ergebnisse aus. Eine Änderung dieser Annahmen führt zu grossen Unterschieden bei der Kostendifferenz zwischen den Strategien «PS-Roboter» und «Standard».

### 9.3 Ergebnisse

**Teilkostenrechnung:** Die Kosten für das Behandeln und Hacken mit der Strategie «PS-Roboter» sind 4 % tiefer als die Kosten der Strategie «Standard» (Abbildung 25). Im «Standard» können die Kosten für die mechanische Unkrautbekämpfung (einmal Hacken, manuelles Jäten) und für das Behandeln klar getrennt werden. Die Spritzkosten betragen 1'483 Fr./ha und die Kosten für die mechanische Unkrautbekämpfung 964 Fr./ha. Bei Letzterem fällt vor allem das Handjäten mit 813 Fr./ha ins Gewicht (Annahmen von Profi Cost, 30 h pro Hektar). Nicht alle Kopfsalatparzellen sind so stark verunkrautet, dass von Hand gejätet werden muss. Entfallen die Kosten für das Handjäten bzw. ist der Aufwand tiefer, ist die Strategie «Standard» kostengünstiger.

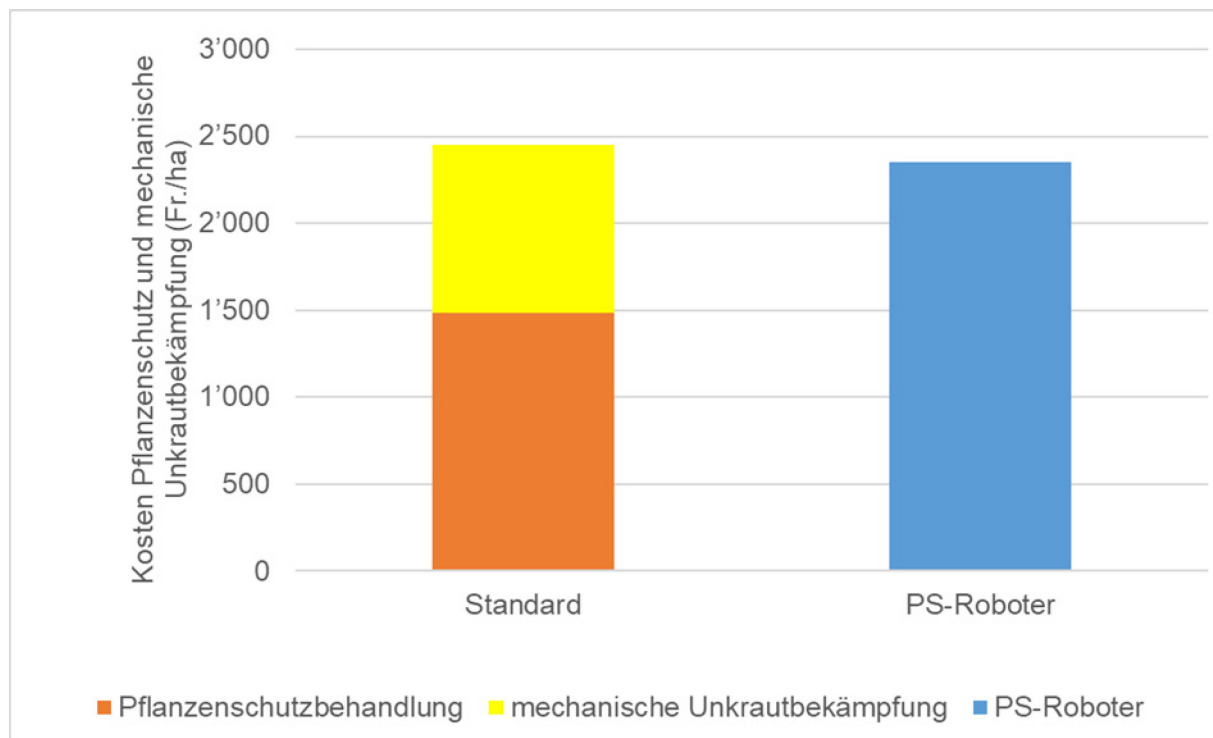


Abbildung 25: Kosten für Pflanzenschutzbehandlung und für die mechanische Unkrautbekämpfung der Strategie «Standard» und «PS-Roboter» im Vergleich. Die Kosten für die mechanische Unkrautbekämpfung und das Spritzen können bei der Standardstrategie klar getrennt werden, ganz im Gegensatz zum PS-Roboter, bei dem beides gleichzeitig erfolgt.

Die Aufteilung der Kosten nach PSM, Maschinen und Arbeitskosten zeigt, dass mit der Reduktion des PSM-Einsatzes mit der Strategie «PS-Roboter» PSM-Kosten gespart werden können, jedoch die Maschinenkosten höher sind (Abbildung 26). Die hohen Arbeitskosten beim Verfahren «Standard» sind hauptsächlich bedingt durch das Jäten (vgl. oben).

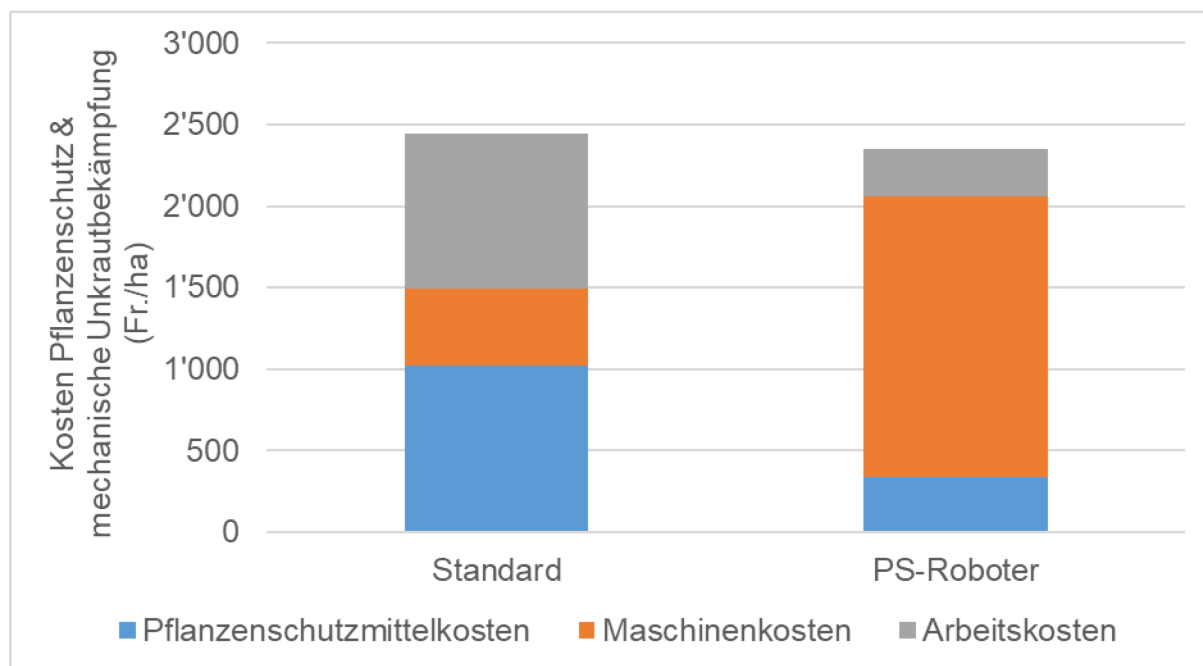


Abbildung 26: Vergleich der Kosten für den Pflanzenschutz zwischen «Standard» und «PS-Roboter» [CHF je ha].

**Produktionskosten gesamt:** Die Kostenverteilung der gesamten Produktionskosten der Strategie «Standard» ist in Abbildung 27 dargestellt.

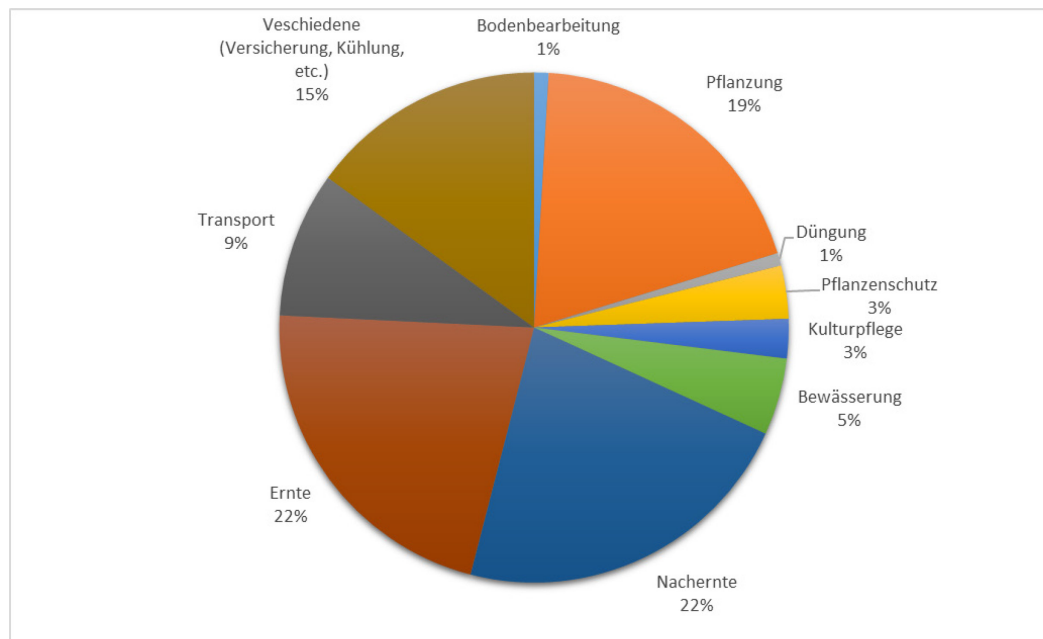


Abbildung 27: Aufteilung der Produktionskosten bei der Strategie «Standard».

Die Pflanzenschutzkosten betragen nur 3 % der gesamten Produktionskosten. Die Kosten für die Kulturpflege betragen ebenfalls 3 %. In diesen sind die Kosten für die mechanische Unkrautbekämpfung (Hacken, Jäten) enthalten.

**Produktionskosten pro Salatkopf:** Mit dem PS-Roboter können pro Hektar rund 95 Fr./ha gespart werden im Vergleich zur Standardstrategie (vgl. Abbildung 25). Angenommen es werden pro Hektar 70'000 Salatköpfe produziert, kann pro Kopf 0.13 Rp. kostengünstiger produziert werden. Muss auf einem Betrieb nicht von Hand gejätet werden, dann ist die Standardstrategie die kostengünstigere und zwar pro Salatkopf 1 Rp. günstiger.



## 10 Diskussion

### Einsparpotential

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass der Prototyp bzw. die Spotspraying-Technologie unter Praxisbedingungen funktioniert. Es konnten beeindruckende Mengen an PSM eingespart werden. Zu beachten ist, dass wir die Einsparung im Vergleich zur ausgebrachten Standard-Brühmenge des Betriebs berechnet haben. Der Betrieb arbeitet mit einer Wasseraufwandmenge von 800 l/ha. Das bedeutet, dass er die bewilligte PSM-Menge pro Hektare mit 800 l Wasser ausbringt. Bei den Behandlungen mit dem Prototyp wurde mit dieser Spritzbrühenkonzentration gearbeitet. Die Annahme war, dass mit dieser Konzentration bei einer guten Benetzung der Pflanzen die Kulturen geschützt werden können. Dies wurde in den Versuchen bestätigt (vergleichbare Wirksamkeit). Die PSM-Reduktion ergab sich daher aus der gezielten Applikation der Kulturpflanzen, aber auch durch die Tatsache, dass auf die behandelte Fläche weniger Spritzbrühe und somit auch weniger Wirkstoff im Vergleich zum Standard (bzw. auch weniger als aufgrund der Zulassung erlaubt ist) ausgebracht wurde. Vergleicht man die im Spotspraying-Verfahren ausgebrachte PSM-Menge mit einer theoretischen Bandbehandlung, fällt die Einsparung tiefer aus. Ebenfalls geringer fällt die Einsparung aus, wenn auf die behandelte Fläche, genau die bewilligte Menge Wirkstoff ausgebracht wird. Nichtsdestotrotz ist das PSM-Einsparpotential dieser neuen Technologie im Vergleich zur Standardtechnik sehr gross.

### Biologische Wirksamkeit

Die biologische Wirksamkeit der Spotspraying-Technologie war in den Versuchen vergleichbar mit der flächigen Behandlung. In den Versuchen wurde jedoch nur die Wirksamkeit gegen Blattläuse in Salaten und gegen Erdflöhe in Pak-Choi untersucht. Je nach Schaderreger-Kultur-Wirkstoff-Kombination sind Minderwirkungen denkbar, beispielsweise bei sehr mobilen Schaderregern und/oder Frass- und Kontakt-Insektiziden. Ob diese gezielte Behandlung beispielsweise bei Fungiziden zu Minderwirkungen führen könnte, ist noch schwerer abzuschätzen. Um dies genauer abzuklären, wären weitere Versuche notwendig. Deren Durchführung wäre aufgrund des Versuchsdesigns sehr aufwändig. Zurzeit ist auch keine Aussage möglich, inwieweit diese gezielte Applikation bei einem grossflächigen Einsatz die Entwicklung von Resistenzen, ganze Insektenpopulationen oder das Pilzinfektionsgeschehen beeinflussen könnte.

### Mehraufwand

Für die Abschätzung der notwendigen Brühmenge müssen vor der Behandlung Messungen im Feld gemacht werden (Dosierschema). Diese können grundsätzlich mit den normalen Feldkontrollen kombiniert werden. Dieser Aufwand könnte eventuell auch mit der Zeit dank Erfahrung reduziert werden. Bei spät(er) durchgeführten Behandlungen decken die Kulturpflanzen einen grossen Teil des Bodens ab und das PSM-Einsparpotential durch die Spotspraying-Technologie ist tief. Diese Applikationen erfolgen mit der normalen Feldspritze. Der Prototyp ersetzt daher nicht die Standardtechnik auf einem Betrieb.

### Hacken und Behandeln

Mit dem Prototyp wurde gleichzeitig behandelt und gehackt. Dies spart Arbeitsgänge ein. Gleichzeitig gibt es eine Reihe von Nachteilen bedingt durch die Kombination dieser beiden Arbeiten. Fürs Hacken sind heisse und trockene Bedingungen optimal. Für Pflanzenschutzbehandlungen liegen die optimalen Temperaturen tiefer. Die Anzahl Störungen steigt, wenn mehrere Arbeiten kombiniert werden. Solche Probleme können teilweise nur per online-Zugriff der firmeninternen Spezialisten gelöst werden. Dies kann zu längeren Arbeitsunterbrüchen führen. Das Hacken war geschwindigkeitslimitierend und es konnte nur mit einer geringen Fahrgeschwindigkeit von 1.5 km/h gearbeitet werden. Diese geringe Schlagkraft wird bei wenigen und zeitlich begrenzten möglichen Behandlungszeitfenstern rasch zu einem Problem. Sie wirkt sich auch nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit aus. Bei der durchgeführten Teilkostenrechnung konnte gezeigt werden, dass der PS-Roboter nur kostengünstiger als der Standard ist, wenn teure Handarbeit (Jäten) eingespart wird. Muss nicht von Hand gejätet werden, sind die Kosten höher als beim jetzigen Standardverfahren (mit rein chemischer Unkrautregulierung und einem Durchgang mit dem Scharhacker). Bedingt durch die geringe Fahrgeschwindigkeit, erfolgten die Behandlungen mit kleinen Düsen. Diese erzeugen kleine Tropfen, die driftnfällig sind.

Zwar kann für Betriebe mit eher kleinen Flächen, vielen Kulturen und viel manueller Unkrautbekämpfung ein PS-Roboter, der Hacken und Behandeln kombiniert, eine gute Lösung sein, aus den genannten Gründen bietet sich aber an, das Hacken und die Pflanzenschutzbehandlungen zu trennen. Dieser Ansatz wird in einem weiteren Projekt nun verfolgt: Mit einem neuen Prototyp, der nur noch für Spotspraying konzipiert ist, sollen Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 6 km/h erreicht werden. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit von Spotspraying. Dank der höheren Fahrgeschwindigkeit kann auch mit grösseren Düsen gearbeitet werden, die grössere Tropfen und somit weniger Drift erzeugen. Insgesamt wird bei der Spotspraying-Technologie und insbesondere beim neuen Prototyp eine starke Driftreduktion im Vergleich zum Standard erwartet, da weniger Wirkstoff ausgebracht wird, die Behandlung nah an der Kulturpflanze und unter Abschirmung erfolgt. Auch die Abschwemmung wird reduziert. Inwieweit die PSM-Einträge in die Umwelt mit dieser neuen Technologie gesenkt werden können, wird in einem weiteren Projekt untersucht.

### **Upscaling und autonomes Arbeiten**

Aus arbeitswirtschaftlicher Sicht wäre es sinnvoll, wenn die derzeitige Arbeitsbreite des Prototyps beispielsweise mit ausklappbaren Segmenten von 1.5 m auf 4.5 m erhöht werden könnte. Diese Erweiterung entspricht der dreifachen Beetbreite. Dies würde bedingen, dass bereits bei der Pflanzung jeweils drei Beete angelegt werden, was andererseits eine Anpassung der Betriebsstruktur erfordern würde.

Das langfristige Ziel der Entwicklung sollte jedoch ein autonomer PS-Roboter sein, der während des Behandlungsprozesses keine menschliche Aufsicht mehr benötigt. In einem Land wie der Schweiz mit hohen Preisen und knappen Arbeitsressourcen kommt der Einführung von Robotern in der Pflanzenproduktion eine besondere Bedeutung zu. Erst wenn die Technologie so weit entwickelt ist, dass die Maschine die Pflanzenschutzmassnahmen unbeaufsichtigt ausführen kann, wird die erwartete Verschiebung des Verhältnisses zwischen Kapital und Arbeit eintreten. Welche Typen von Robotern konkret auf den Markt kommen, hängt unter anderem von der Marktgrösse ab. Im Jahr 2016 führte Schnieper (S. Schnieper, Hackroboter im Gemüsebau. Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg, Gränchen, Schweiz, 2016) eine Studie über Hackroboter auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz durch. Zu diesem Zeitpunkt waren digital unterstützte Geräte von vier Herstellern im Handel erhältlich. Nach Angaben der Vertriebsgesellschaften wurden 23 bis 29 Geräte in den Betrieben eingesetzt. Der jeweilige Anteil der vier Marken lag zwischen drei und 15 Geräten.

Es ist anzunehmen, dass hochspezialisierte Roboter nur für relativ grosse Märkte und/oder Cashcrops auf den Markt kommen. Der laufende Transformationsprozess in der Landwirtschaft legt nahe, dass die Branche Schritte von der Automatisierung zur Autonomie unternehmen sollte. Allerdings ist diese Entwicklung in der Gemüseproduktion noch nicht so weit fortgeschritten wie bei den Feldkulturen. Ein Allzweckroboter mit spezialisierten Anbaugeräten wäre wahrscheinlich die attraktivste Perspektive für ein Mosaik von Nischenmärkten. Bis dahin hängt es stark von der Politik ab, welche Technologien eine Chance auf Einführung in die Praxis bekommen. Ausserdem muss der rechtliche Rahmen für autonome Arbeiten in der Landwirtschaft definiert sein.

### **PSM-Einträge in die Umwelt reduzieren – Anreize schaffen**

Mit Entwicklungen wie dem Prototyp könnten Betriebsleitende kurz- bis mittelfristig Unterstützung zur Einhaltung von Vorgaben zur PSM-Einsparung erhalten. Wenn diese Technologien zusätzlich durch die Politik gefördert würden, hätten sie eine realistische Perspektive, sich in der Praxis zu etablieren.

Bei wirtschaftlichen Überlegungen sind Effizienz und Kostenwirksamkeit jedoch nicht die einzigen Anreize für den Einsatz einer neuen Technologie. Bei vielen PSM-Anwendungen müssen inzwischen Auflagen zu Drift und Abschwemmung beachtet werden. Die Ziele des Umweltschutzes werden immer umfassender und komplexer, und es ist zu erwarten, dass in Zukunft noch strengere Vorschriften und Auflagen erlassen werden. Die Anreize für die Markteinführung des Prototyps erhalten eine zusätzliche Dimension, wenn auch der Verbraucher in die Gleichung einbezogen wird. Qualitätssiegelprogramme (Labels) könnten auch das Argument berücksichtigen, den Einsatz von PSM zu reduzieren. Der Einsatz dieser neuen Technologie könnte sich auch als attraktiv erweisen, wenn der Konsument bereit ist, eine Prämie für Produktionsmethoden mit geringeren Umweltauswirkungen zu zahlen, oder wenn der Staat Landwirtinnen und Gemüseproduzenten für die Einführung umweltfreundlicher Produktionsmethoden entschädigt.

## 11 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die Spotspraying-Technik bzw. der Prototyp funktioniert: Die Kulturpflanzen wurden präzise behandelt. Gleichzeitig konnte in und zwischen den Reihen gehackt und so Herbizid eingespart werden. Der Prototyp wurde in verschiedenen Kulturen eingesetzt und dabei auch weiter optimiert (mehrheitlich technische Aspekte). Mit dem Dosierschema kann die benötigte Brühmenge ausreichend genau im Voraus berechnet werden.

In den durchgeführten Versuchen war die biologische Wirksamkeit der Spotspraying-Technik vergleichbar mit dem Betriebsstandard. Gleichzeitig konnten bedeutende Mengen an PSM eingespart werden. Es wurden jedoch nur zwei Kultur-Schaderregerkombinationen betrachtet. Der Aspekt möglicher Minderwirkungen beim Einsatz dieser neuen Technik müsste dementsprechend noch genauer untersucht werden.

Demgegenüber hat sich gezeigt, dass die geringe Fahrgeschwindigkeit, bedingt durch das gleichzeitige Hacken, die Schlagkraft und damit verbunden die Wirtschaftlichkeit stark einschränkt. Dies gilt für Betriebe mit einem geringen Unkrautdruck. Auf denen mit dem Prototyp wenig, teures Jäten von Hand eingespart werden kann. Kann mit dem Prototyp hingegen teure Handarbeit ersetzt werden, ist die Wirtschaftlichkeit vergleichbar mit dem Standardverfahren. Nichtsdestotrotz ist die geringe Schlagkraft bedingt durch die geringe Arbeitsbreite und die tiefe Arbeitsgeschwindigkeit ein limitierender Faktor für eine erfolgreiche und breite Markteinführung.

Die arbeitswirtschaftlichen Untersuchungen haben gezeigt, in welchem Umfang Potential für die Reduktion des Arbeitszeitbedarfs gegeben ist und dadurch eine höhere Flächenleistung erzielt werden könnte. Die geringe Schlagkraft beruht nicht allein auf der langsamen Fahrgeschwindigkeit bedingt durch das Hacken. Die Störanfälligkeit ist ebenfalls erhöht, wenn zwei komplexe Tätigkeiten wie das kameragesteuerte Hacken und das kameragesteuerte Applizieren von einem Gerät gleichzeitig durchgeführt werden. Es wäre wünschenswert, wenn auch aktuell nicht optimal gelöste Aspekte, wie beispielsweise die Bedienerfreundlichkeit des Displays, bei der Anwendung einer neuen digitalen Technologie beachtet würden.

In einer Umfrage von Agroscope wurden Expertinnen und Experten zur Technologienutzung im Feldgemüsebau befragt (J. Ammann et al., Prognosen zur Nutzung digitaler Technologien im Schweizer Freilandgemüsebau. Agrarforschung Schweiz, 13, 2022, 34-40). Die Teilnehmenden sind sich einig, dass die Bedeutung von Hackrobotern in Zukunft steigen wird. Man geht von einem Anstieg von derzeit ca. 10 % aller Betriebe, die digital gestütztes Hacken einsetzen, auf über 50 % bis in 10 Jahren aus. Neben der Ressourceneinsparung (Hilfsstoffe) wurden u.a. auch die Arbeitszeiteinsparung und die Einhaltung der Gesetze als wichtige Gründe für die Nutzung genannt. Gründe, die gegen Hackroboter im Gemüsebau sprechen, sind hohe Kosten, Störungsanfälligkeit und mangelndes Fachwissen. Diese Hindernisse könnten gemäss den Befragten durch Ausbildung, Unterstützung bei der Einführung, Felddemonstrationen und Praxisnähe sowie nicht zuletzt durch finanzielle Unterstützung abgebaut werden. Die bei den Hackrobotern genannten Nachteile können auch bei der Spotspraying-Technologie angeführt werden. Ebenso die genannten Möglichkeiten, um diese Hindernisse zu überwinden.

Dank der Erfolge und Erfahrungen aus dem vorliegenden Projekt konnte ein Folgeprojekt akquiriert werden. Es handelt sich dabei um ein Umwelttechnologie-Förderungsprojekt (BAFU). Dieses finanziert den Bau eines neuen Prototyps mit, der nur noch für Spotspraying von Fungiziden und Insektiziden konzipiert ist. Die Unkrautbekämpfung ist entkoppelt von der Spotspraying-Behandlung, d.h. diese erfolgt nicht mit dem neuen PS-Roboter. Durch diese Entkoppelung kann die Fahrgeschwindigkeit voraussichtlich vervierfacht werden. Ein Quantensprung in Bezug auf Flächenleistung.

Neben der Schlagkraft und Wirtschaftlichkeit können auch andere Anreize dazu führen, dass eine neue Technologie eingesetzt wird. Viele PSM haben inzwischen Umweltauflagen in Bezug auf Drift und Abschwemmung. Die Schutzziele im Bereich Umwelt und Ökotoxikologie werden immer umfassender und komplexer. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft weitere Auflagen verfügt werden. Bei der Spotspraying-Technik werden die PSM gezielt und nah bei der Kulturpflanze ausgebracht. Daher sollte es zu deutlich weniger Drift, aber auch zu weniger Abschwemmung kommen. Dies soll in einem weiteren Nachfolgeprojekt genauer untersucht werden. Würde beispielsweise die Spotspraying-Technik in die «Weisungen der Zulassungsstelle betreffend die Massnahmen zur Reduktion der Risiken bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln» aufgenommen, könnte der Technologie dank dieses zusätzlichen Anreizes zum Durchbruch verholfen werden.

## 12 Dank

Die Projektpartner – Vertreter aus der Branche, der Beratung und der Wissenschaft – danken AgriQnet für die Finanzierung des Projekts «Ressourcenschonender, nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter». Dieses Projekt hat die Entwicklung, Förderung und Bekanntmachung der nachhaltigen Applikationstechnik Spotspraying im Schweizer Gemüsebau möglich gemacht.

## Appendix

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Artikel, Konferenz- und Tagungsbeiträge veröffentlicht:

Duckert F., Keller M., Matter R., 2020. Projekt «Ressourcenschonender und nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau». In: QuNaV AgriQnet Webinar. 28. Januar, Internet - BLW Fachbereich Qualitäts- und Absatzförderung. 2020.

Glück S. und Heitkämper K., 2022. Arbeiten mit digitalen Technologien – Eine Fallstudie am Beispiel von sensor- und kameragesteuertem Hacken im Gemüsebau. In: Jakob M. (Hrsg.), «Arbeit unter einem D-A-CH: Der Landwirt im 4.0-Modus», 23. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium 08./09.März 2022 (Tagungsband), Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Potsdam, 122-131.

Haberey P., Hodel D., Collet L., Bucher C., Anken T., Total R., Keller M., 2021. Efficiency evaluation of automated insecticide spot spraying in lettuce and bok choy fields. In: Precision agriculture '21. June 25, Hrsg. John V. Stafford, Wageningen Academic Publishers. 2021, 121-128.

Haberey P., Total R., Keller M., 2021. Spot spraying en cultures maraîchères : conformité des volumes pulvérisés par plante. *Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture*, 53, (2), 2021, 80-84.

Heitkämper K., Reissig L., Bravin E., Glück S., Mann S., 2022. Digital Technology Adoption for Plant Protection: Assembling the Environmental, Labour, Economic and Social Pieces of the Puzzle. In: Smart Agricultural Technology, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100148>.

Heitkämper K., Reissig L., Bravin E., Keller M., 2022. How does the use of a digital technology affect labour, economy and social issues on a farm? In: XX CIGR World Congress 2022, International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, Kyoto, Japan, 5.-10. December 2022.

Hodel D., Collet L., Steiner R., Bucher C., Möri H., Wyssa T., Duckert F., Hauenstein S., Matter R., Anken T., Total R., Keller M., 2020. Auf dem Weg zu einem nachhaltigen Pflanzenschutz: Einzelpflanzenbehandlung in Pak-Choi mit dem Steketee Pflanzenschutzroboter. Hrsg. Agroscope, Wädenswil. Mai, 2020, 1 S.

Keller M., Haberey P., Hodel D., Collet L., Steiner R., Bucher C., Möri H., Wyssa T., Duckert F., Hauenstein S., Matter R., Anken T., Total R., 2021. Spot Spraying im Gemüsebau: Deutliche Pflanzenschutzmittelreduktion möglich, aber anspruchsvoll. *Agroscope Transfer*, 353, 2020, 1-2.

Keller M., Guyer A., Hodel D., Haberey P., 2021. Kohlerdföhe. *Gmüesblatt*, 3, 2021, 3.

Wullschleger G., Collet L., Steiner R., Bucher C., Möri H., Wyssa T., Duckert F., Koller M., Matter R., Anken T., Total R., Keller M., 2020. Auf dem Weg zu einem nachhaltigen Pflanzenschutz: Einzelpflanzenbehandlung in Salat mit dem Steketee Pflanzenschutzroboter. Hrsg. Agroscope, Wädenswil. Mai, 2020, 1 S.