

Unkrautbekämpfung durch Foliendämpfung im Freiland – Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Energieeinsparung

Foil stream treatment for weed control in open areas – ways to improve biological efficiency and reduce fuel consumption

Detlef Stieg^{1*}, Hans-Peter Söchting²

¹Julius Kühn-Institut (JKI), Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig,

²Julius Kühn-Institut (JKI), Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig

*Korrespondierender Autor, detlef.stieg@julius-kuehn.de

DOI 10.5073/jka.2020.464.064



Zusammenfassung

Das Foliendämpfen wird im JKI zur Inaktivierung von Unkrautsamen bei der Saatbettvorbereitung im Freiland verwendet. In der praktischen Umsetzung zeigte sich eine teilweise unzureichende Wirkung bei gleichzeitig hohem Energieaufwand. Durch begleitende Temperaturmessungen wurde versucht die thermisch-physikalischen Prozessabläufe im realen Freilandversuch zu identifizieren, um somit Ansatzpunkte zur biologischen Effizienzverbesserung und Energieeinsparung zu gewinnen. Auf Basis dieser Erkenntnisse und vorhandener Literatur wurden Möglichkeiten zur Effizienzverbesserung postuliert.

Unter Berücksichtigung dieser Postulate wurde ein weiterer Versuch durchgeführt. Dabei wurden zum Nachweis der Effektivität thermophile Samen und Samen wichtiger, im Gartenbau relevanter Unkrautarten auf einer zu dämpfenden Fläche ausgelegt. Die Samen wurden nach verschiedenen Dämpfzeiten entnommen und ihre Keimfähigkeit überprüft. Im Versuch konnte die Wirkung zusätzlicher thermischer Isolation und optimierter Prozessführung (*reduzierte Dämpfdauer*) gezeigt werden. Beim derzeitigen Stand der Optimierung liegt der erforderliche Energiebedarf bei realen Bedingungen und vollständiger biologischer Wirksamkeit bei ca. 17,2 kWh/m². Eine weitere Reduzierung um ca. 24 % erscheint möglich.

Stichwörter: Foliendämpfen, thermische Unkrautbekämpfung

Abstract

Steam treatment (foil stream treatment) of soil to avoid the germination of weeds in open areas is a used application in JKI. The practical experience showed sometimes bad efficiency regarding weed control and high energy consumption. By accompanying the treatments with temperature measurements the thermodynamic physical processes should be identified in the real open area application to find practical ways to improve the biological and energy efficiency. Based on those results and literature, possibilities for improvement were postulated and realized in a further test. Additionally, thermophile seeds and horticultural important seeds were treated for different processing times and the germination capacity was controlled. The test showed the influence of additional thermal isolation and process control (time limit). In the current stage of optimization an energy consumption of 17.2 kWh/m² for real open area applications with full weed avoidance was reached. An additional 24% decrease in energy consumption seems possible.

Keywords: Foil stream treatment, thermal weed control

Einleitung

Nichtchemische Verfahren zur Unkrautbekämpfung gewinnen in allen Anwendungsbereichen an Bedeutung. Auch wenn das Dämpfen von Böden zur Unkrautbekämpfung im Feldbau allgemein weniger gebräuchlich ist, so stellt es bei speziellen Kulturen ein verbreitetes und anerkanntes Verfahren zur Saatbettvorbereitung (Hygienisierung) dar. Hierbei wird die Variante mit den geringsten Anforderungen an die Infrastruktur -dem Foliendämpfen- üblicherweise im Unter-Glas-Anbau genutzt. Dagegen werden im Freiland vor allem effizienzoptimierte, auch selbstfahrende Systeme mit mobilen Haubendämpfern eingesetzt. Auf Grund des hohen Investitionsbedarfs sind diese Systeme aber nicht für alle Anwendungsanforderungen geeignet. Im Julius Kühn-Institut wird das Foliendämpfen zur Inaktivierung von Unkrautsamen auf einzelnen Freilandflächen angewendet. Unabhängig von der Ausführung des Dämpfsystems beruht die Wirkungsweise dieses

Verfahrens auf der Schädigung des Pflanzen- bzw. Samenmaterials durch Erhitzung auf Temperaturen oberhalb von ca. 60 °C – 70 °C (GUDEHUS, 2005).

Das prägende Merkmal aller Dämpfmethoden ist die Verwendung von Wasserdampf als Wärmeträger. Genutzt wird hierbei die Eigenschaft des Dampfes, bei Kondensation eine erhebliche Wärmemenge frei zu setzen, die um ein Vielfaches über der des reinen Abkühlens von Wasser ohne Aggregatzustandsänderung liegt.

Ziel der Untersuchung

In der hier untersuchten Variante, dem „Foliendämpfen“, wird eine luftdichte und temperaturfeste Kunststoffolie (PVC) über der zu behandelnden Fläche installiert, so dass sich bei Einleitung des Wasserdampfes unter der Folie ein heißer Gasraum ausbildet, der dafür sorgt, dass der eingeleitete Wasserdampf über der Behandlungsfläche zirkulieren und somit die gesamte Behandlungsfläche mit Wasserdampf durchdrungen werden kann. Von großer Bedeutung für die Wirksamkeit des Verfahrens ist ein hoher Anteil offener Poren im Bodenvolumen zur Erzielung eines möglichst geringen Penetrationswiderstands und damit einem Kondensieren möglichst dicht am eventuell vorhandene Unkrautsamen (GUDEHUS, 2005). Auf Grund von Zielkonflikten und Freilandbedingungen lässt sich dieser Optimalzustand real nur bedingt erreichen, was im Einzelfall zu erheblichen Kostensteigerungen bei gleichzeitiger Wirkungsminderung des Behandlungserfolges führen kann.

Ziel dieser Untersuchungen war und ist es diese physikalischen Wirkungsparameter zu identifizieren, nachzuweisen und Möglichkeiten zur Optimierung zu finden. Hierzu lassen sich die Untersuchungen in zwei Phasen aufteilen. Die hier vorgestellte Arbeit bezieht sich auf die Untersuchung der zweiten Phase auf die im Abschnitt „Material und Methoden“ näher eingegangen wird.

Erste Phase: Erhebung des Ist-Zustandes. Die Untersuchungen wurden hierbei nicht speziell angelegt, vielmehr wurde der Dämpfbetrieb mit Temperaturmessungen begleitet. Auf Basis der Messungen und unter Beachtung einschlägiger thermodynamisch/physikalischer Zusammenhänge wurde ein Postulat über die physikalischen Abläufe und Einflussmöglichkeiten zur Effektivitätsverbesserung und/oder zur Aufwandminimierung erstellt (STIEG, 2016).

Hiernach führte die geringe Wärmeisolation der Folie in Verbindung mit den geringen Außentemperaturen zu einer verstärkten Kondensation des Wasserdampfes an der inneren Folienoberfläche, was zur Folge hatte, dass die zur Bodenerwärmung zur Verfügung stehende Wärmemenge drastisch sank. Zudem sorgte das von der Folienoberfläche abtropfende Kondensat zu einer erheblichen Verminderung des offenen Porenvolumens des Zielbodens und im Extremfall zur Verschlämmung der Zielfläche. Hierdurch konnten die tiefer liegenden Bodenschichten nur noch mittels Wärmeleitung erwärmt werden. Eine einfache Erhöhung der Dämpfzeit zur Kompensation dieser Effekte und somit zur Erreichung der angestrebten Bodentemperatur in 8 cm Tiefe ist damit und in Übereinstimmung mit Angaben von GUDEHUS (2005) nicht problemlos möglich, da die hierfür benötigte zusätzliche Kondensatmenge die Bodenverschlämmung weiter fördert, der ablaufende Kondensatstrom erhebliche Wärmemengen der Behandlungsfläche (dem Behandlungsbodenvolumen) entzieht und die Bodenverschlämmung zum Druckanstieg im Gasraum führt. Hierdurch kann es dann vermehrt zum örtlichen Versagen der Folienabdichtung am Boden und zum Zusammenbruch des kontrollierten Dämpfprozesses kommen.

Material und Methoden

Bei der Untersuchung der zweiten Phase wurden die Einflussparameter optimiert und ebenfalls durch begleitende Temperaturmessungen dokumentiert. Zur Vergrößerung des offenen Porenvolumens in der oberen Bodenschicht wurde die Versuchsfläche einige Tage vor dem Dämpfen auf einer Tiefe von ca. 15 cm gepflügt. Zur besseren thermischen Isolation des Wasserdampfes von der Umgebungsluft wurde während des Dämpfens ein zusätzliches Vlies über der Dämpffolie ausgebreitet. Wie bei den Versuchen in Phase 1 wurden auf der Versuchsfläche von

ca. 5 m x 13 m Temperatursensoren (PT1000 und Thermolemente Typ-K) in einer Tiefe von 8 cm installiert. Die hierbei gewonnenen Temperaturdaten wurden im Zeitraster von 5 min aufgezeichnet.

Um die Wirkung des Erhitzens auf die Keimfähigkeit von Unkrautsamen zu prüfen wurden Samenpakete von 21 im Gartenbau auftretenden wichtigen Unkräutern (Tab. 1) an verschiedenen Stellen im Dämpfbereich jeweils in unmittelbarer Nähe eines der ausgelegten Thermometer in 8 cm Tiefe platziert und zu verschiedenen Zeitpunkten entnommen. Die Samenpakete bestanden aus einem Teefilter, in den 50 Samen je Unkrautart eingelegt wurden und die dann in eine Hülle aus Kunststoff-Gaze gesteckt und in einem Drahtgestell eingeklemmt wurden. Diese Pakete wurden dann mit Hilfe von Schnüren zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des laufenden Dämpfvorganges aus dem Dämpfbereich entnommen. Auf diese Weise wurden unterschiedliche Behandlungszeiträume oberhalb der angenommenen Schädigungsgrenztemperatur von 60 °C realisiert.

Nach der Entnahme aus dem Dämpfbereich wurden die Unkrautsamen sofort aufbereitet, indem sie aus der Gaze entnommen und mitsamt dem Teefilter in Kunststoffbechern mit Aussaaterde ausgelegt wurden. Parallel dazu wurden neben den gedämpften Unkrautsamen auch ungedämpfte Samen der getesteten Arten als Kontrolle ausgelegt.

Im Anschluss wurden sämtliche Proben bei 20 °C, 14 Stunden Tageslicht sowie 10 Stunden Dunkelheit im Gewächshaus aufgestellt. Die Keimung der Unkrautsamen wurde über einen Zeitraum von vier Wochen beobachtet.

Unter den Unkrautarten waren mit *Digitaria sanguinalis* und *Datura stramonium* auch zwei Arten, die aus Vorversuchen bekanntermaßen sehr unempfindlich gegen Hitzeeinflüsse sind. Beide Arten wurden nicht nur in den Gazepaketen, sondern zusätzlich auch auf der Dämpffläche direkt im Boden ausgelegt. Dafür wurden in zwei Bodentiefen (4 cm und 10 cm) vor und nach dem Dämpfdurchgang jeweils 100 Samen an markierten Stellen eingebracht. Nach der Einsaat (bzw. vor oder nach dem Dämpfvorgang) wurden die entsprechenden Stellen nicht weiter bearbeitet. Im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode wurde dann der Auflauf der Pflanzen an den betreffenden Stellen bonitiert.

Tab. 1 Im Rahmen des Versuches geprüfte Unkrautsamen.

Tab. 1 In the experiment used weed seeds.

Nr.	EPPO-Code	Wiss. Name	Deutscher Name	Keimfähigkeit der Kontrolle in %
1	AMAAL	<i>Amaranthus albus</i>	Weißer Amarant	48
2	AMARE	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Zurückgebogener Amarant	82
3	ANCOF	<i>Anchusa officinalis</i>	Gemeine Ochsenzunge	98
4	AETCY	<i>Aethusa cynapium</i>	Hunds-Petersilie	76
5	LITAR	<i>Buglossoides arvensis</i>	Acker-Steinsame	58
6	CAPBP	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	Gemeines Hirtentäschel	86
7	CHEAL	<i>Chenopodium album</i>	Weißer Gänsefuß	58
8	DATST	<i>Datura stramonium</i>	Weißer Stechapfel	86
9	DIGSA	<i>Digitaria sanguinalis</i>	Blutrote Fingerhirse	98
10	ECHCG	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Gemeine Hühnerhirse	88
11	GASPA	<i>Galinisoga parviflora</i>	Kleinblütiges Franzosenkraut	0
12	HYSNI	<i>Hyoscyamus niger</i>	Schwarzes Bilsenkraut	0
13	MERAN	<i>Mercurialis annua</i>	Einjähriges Bingelkraut	36
14	MYOAR	<i>Myosotis arvensis</i>	Acker-Vergissmeinnicht	58
15	PANCA	<i>Panicum capillare</i>	Haar-Hirse	4
16	POAAN	<i>Poa annua</i>	Einjährige Rispe	98
17	SENVU	<i>Senecio vulgaris</i>	Gemeines Kreuzkraut	76
18	PESGL	<i>Setaria glauca</i>	Fuchsrote Borstenhirse	88
19	SOLNI	<i>Solanum nigrum</i>	Schwarzer Nachtschatten	84
20	STEME	<i>Stellaria media</i>	Vogel Sternmiere	64
21	THLAR	<i>Thlaspi arvense</i>	Acker-Hellerkraut	78

Ergebnisse

Beim Versuch der Phase 2 herrschten folgende Wetterbedingungen: 8 °C - 12 °C Lufttemperatur, leichter Wind, trocken und sonnig. Das offene Porenvolumen lag im Bereich dessen was unter Idealbedingungen in einem Frühjahrstag (April) im Freiland in Deutschland bei einem lehmigen Sandboden zu erwarten ist.

Nach ca. 120 min Dämpfzeit wurde in 8 cm Tiefe eine mittlere Bodentemperatur von 65 °C erreicht (93 °C im Bereich des Dampfeinlasses).

Die Aufheizrate des Bodens nahm im zeitlichen Verlauf, vermutlich auf Grund des geringer werdenden Temperaturunterschiedes ab.

In 8 cm Bodentiefe und im Bereich um 60 °C ergaben sich so Aufheizraten zwischen 2,5 °K/10min und 3,4 °K/10min, während die Aufheizrate im Bereich des Dampfeinlasses bei 8,8 °K/10min lag. Die Grenztemperaturen wurden innerhalb von 95 – 115 min erreicht, im Dampfeinlassbereich bereits nach 45 min. Die höchste gemittelte Aufheizgeschwindigkeit (4 Messstellen mit Thermoelementen Typ-K in 8 cm Bodentiefe) liegt bei 0,9 °K/min und wird bei 21 °K Temperaturerhöhung nach ca. 45 min Dämpfzeit erreicht.

120 min nach Erreichen der 60 °C-Marke bzw. 155 min nach Beginn wurde die Dampfeinleitung beendet. Zu diesem Zeitpunkt lag die gemittelte Bodentemperatur bei 70,7 °C (+/- 3 °C). Das Temperaturmaximum der Bodentemperaturen stellte sich ca. 12 - 17 min nach Ende der Dampfeinleitung mit einer gemittelten Temperatur von 72,1 °C (-4/+2 °C) ein. Hierbei war die Versuchsfläche weiterhin abgedeckt.

Unregelmäßige Messungen der dem Dampferzeuger zugeführten Wassermenge über die Versuchsdauer deuten auf einen weitgehend linearen Wasserverbrauch bzw. gleichbleibende Wärmezufuhr hin. Der gemessene Wasserverbrauch und damit die Dampfmenge liegt bei ca. 22 l/m².

Die Oberflächentemperatur der Folie betrug ca. 91°C - 98 °C. Die Temperaturmessung mittels Infrarotthermometer auf der unebenen weiß-grauen Vliesoberfläche ergab Temperaturen zwischen 51 °C und 61 °C. Nach ca. 130 min Dämpfzeit wurde das kontrollierte Dämpfen dadurch erschwert, dass sich die Folie übermäßig aufblies und es auch hier verstärkt zum bereits beschriebenen Versagen der Folienabdichtung und damit zu größeren Undichtigkeiten und dem Entweichen des Wasserdampfes kam.

Im Verlauf der nach dem Dämpfen folgenden Vegetationsperiode zeigte die behandelte Fläche kein Auflaufen von Unkräutern. Auch aus den behandelten Proben der Samenpakete war bei keiner Unkrautart und unabhängig von der Behandlungsdauer eine Keimung zu verzeichnen, während die unbehandelten Kontrollvarianten fast alle sehr hohe Keimraten zeigten (Tab. 1).

Von den Samen der Unkräuter, die direkt in die Behandlungsfläche gelegt und so mitbehandelt wurden (*Datura stramonium*, *Digitaria sanguinalis*), lief in beiden Bodentiefen und von beiden Arten keine Pflanze auf. Bei den nach der Dämpfung ausgesäten Pflanzen lag die Keimfähigkeit bei *D. stramonium* bei 10 cm Tiefe bei 20 % und bei 4 cm Tiefe bei 43 %. *D. sanguinalis* lief bei 10 cm Tiefe nicht auf, bei 4 cm Tiefe liefen 15 % der ausgelegten Samen auf. Es zeigte sich, dass durch das Dämpfen ein vollständiger Bekämpfungserfolg gegenüber diesen beiden Arten erzielt wurde.

Obwohl der Wassersättigungsgrad und das offene Porenvolumen weit vom theoretischen Optimum entfernt sind, scheinen die Randbedingungen des Versuches nahe am real erreichbaren Optimum zu liegen, wenn von nicht idealem Boden, einem überschaubaren Vorbereitungsaufwand (einmaligem Pflügen auf 15 cm Tiefe) und von frühjährlichen (März-April) niederschlagsfreien Perioden von max. 3 - 4 Tagen und keinem Bodenfrost ausgegangen werden kann.

Die Variationen im (Boden-)Temperaturverlauf deuten sowohl auf den Einfluss kleinräumiger Unterschiede in der Durchdringungsfähigkeit des Bodens wie auch auf einen nicht homogen durchströmten Gasraum hin. Auch die zu erwartenden „Totwassergebiete“ in den Ecken des Gasraumes konnten im Anschluss des Versuches als Bereiche mit verschlammter Bodenoberfläche

identifiziert werden. Hierzu passte auch die Beobachtung, dass im Bereich mit ausreichender Energiezufuhr (Einlassbereich der Dampfleitung) der Boden optisch und haptisch trocken erschien. Zudem belegen die Temperaturmessungen in diesem Bereich die zuvor beschriebene außergewöhnlich hohe Temperatur und Bodenerwärmungsrate, verglichen mit den übrigen Bereichen. Dies deutet darauf hin, dass es zu den im Postulat beschriebenen Vorgängen kommt, was bedeutet, dass der Wasserdampf im Eintrittsgebiet immer noch überhitzt ist und der zu Versuchsbeginn (im „kalten“ Boden) auskondensierte Wasserdampf durch den ausreichenden Energienachschub im Verlauf des Versuches wieder verdampfen kann. Wodurch wiederum in diesem Bereich die Bodenporen offen, nicht mit Kondensat gefüllt und damit für den Wasserdampf gut durchdringbar bleiben.

Diskussion

Die in der Literatur (GUDEHUS, 2005) angegebene tiefenabhängige Zeitverzögerung der Temperaturreaktion von 22 cm/h konnte in der Größenordnung durch den Versuch in Phase 2 bestätigt werden. Hierbei kam es nach ca. 10 – 15 min zu einer ersten klaren Temperaturerhöhung von ca. 1 °K (+/-0,4) woraus sich eine „Durchdringungsgeschwindigkeit“ von ca. 48 - 32 cm/h ergibt. Hierbei ist jedoch auf Grund der geringen Bodentiefe von 8 cm in Verbindung mit der rauen und porösen Oberfläche von einer erhöhten Ungenauigkeit auszugehen.

Die laut GUDEHUS (2005) erforderliche Mindesttemperatur von 60 °C – 70 °C zur Unkrautinaktivierung konnte bestätigt werden. Die im optimierten Versuch erreichte gemittelte Bodentemperatur betrug maximal ca. 72 °C, was zur vollständigen Inaktivierung auch hitzeunempfindlicher Unkrautsamen ausreichte.

Mit einer angenommenen Wassereintrittstemperatur von 8 °C, einer Dampfaustrittstemperatur von 200 °C (SEIFERT, 2010) und einem Wasserverbrauch von 1417 l ergab sich ein Wärmeenergieverbrauch von ca. 1118 kWh (CERBE und HOFFMANN, 1987) oder flächenbezogen von ca. 17,2 kWh/m². Mit der Annahme eines Dampferzeugerwirkungsgrades von maximal 92 % (GUDEHUS, 2005) würde sich hieraus ein Brennstoffbedarf als Heizöläquivalent von mind. 113 l oder flächenbezogen von 1,74 l/m² Heizöl EL ergeben.

Zur Abschätzung des zukünftigen Brennstoff-Einsparpotentials wird ebenfalls der Wasserverbrauch herangezogen. Hierzu wird davon ausgegangen, dass nach Erreichen der Grenztemperatur von 60 °C (Versuch 2019 nach 115 min) die Dampfeinleitung abgebrochen werden kann. Wie beschrieben würde das Temperaturniveau noch für einen längeren Zeitraum auf mindestens gleichem Niveau verbleiben. Es wird erwartet, dass durch die Verkürzung auf 74 % der Dampferzeugerlaufzeit der Energieverbrauch in gleicher Höhe auf ca. 12,7 kWh/m² bzw. der Heizölverbrauch auf ca. 1,29 l/m² reduziert werden könnte, ohne Wirkungseinbußen befürchten zu müssen. Dieser Annahme soll in einem zukünftigen Versuch nachgegangen werden.

Literatur

- CERBE, G., H.J. HOFFMANN, 1987: Einführung in die Wärmelehre, 8. Auflage. Hanser Verlag 1987, München.
- GUDEHUS, H.C., 2005: Dämpfen im Gartenbau. Osnabrücker Beiträge zum Gartenbau 6/2005. Fachhochschule Osnabrück, Osnabrück.
- SEIFERT, M. 2010: Bodendämpfung – Dämpftechnik und Dämpfsysteme für ihren Einsatz. Produktpräsentation zu MSD-Dampfkesseln für Dämpfsysteme, MSD-GmbH 2010.
- STIEG, D., 2016: Untersuchungen zum Energieeinsparpotential beim Flächendämpfen von Böden im Freiland durch optimierte Prozessführung. Julius-Kühn-Archiv **454**, 170.