

Entwicklung eines Applikationssystems zur selektiven, thermischen Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen mit Pflanzenöl

Jürgen Peukert, Peter Schulze Lammers, Lutz Damerow

Der Einsatz von thermischen Unkrautbekämpfungsverfahren in Reihenkulturen ist wegen einer unzureichenden Präzision derzeit nicht für die selektive Unkrautkontrolle geeignet. Abflämm-, Heißwasser-, Heißdampf- oder Heißschaumgeräte haben aufgrund ihrer breitflächigen Wirkweise den Nachteil, dass sie – um Schäden zu vermeiden – einen relativ großen Sicherheitsabstand zur Kulturpflanze benötigen. Die Spritzapplikation von heißen, pflanzlichen Ölen aus nachwachsenden Rohstoffen soll neben einer hohen Präzision bei der Ausbringung auch eine effektive und umweltfreundliche Bekämpfung von Unkräutern sogar im Intra-row-Bereich ermöglichen. Am Institut für Landtechnik der Universität Bonn wurde ein Prototyp eines Applikationssystems entwickelt, mit dessen Hilfe umfangreiche Laborversuche durchgeführt werden können, um die Schadwirkung von heißen Pflanzenölen an verschiedenen Ackerunkräutern zu erforschen.

Schlüsselwörter

Pflanzenschutztechnik, Precision Farming, Ökologischer Landbau, Pflanzenöle, Unkrautregulierung

Die Regulierung von Unkräutern zum Schutz der Kulturpflanze ist im Erwerbsfeldbau von besonderer Bedeutung (KOCH 1967). Dabei besetzen thermische Unkrautbekämpfungssysteme im Vergleich zu den vorrangig eingesetzten, weit verbreiteten chemischen und mechanischen Unkrautbekämpfungssystemen derzeit eher eine Nische, weisen jedoch entscheidende Vorzüge im Bereich der gesellschaftspolitischen Akzeptanz und Umweltverträglichkeit auf (HUBER und KLEISINGER 2006).

Herkömmliche Abflämmgeräte werden insbesondere im Ökologischen Landbau zur Unkrautbekämpfung im Voraufbau eingesetzt, haben jedoch den Nachteil, dass sie flächig und daher nur bedingt selektiv zwischen der Reihe (inter-row) bei einem gleichzeitig großen Abstand zur Kulturpflanze eingesetzt werden können (DIVER 2002). Verschiedene Optimierungsbemühungen haben gezeigt, dass dieses Verfahren hinsichtlich seiner Wirksamkeit und seiner Effizienz bisher nicht befriedigend ist (BERTRAM 1996), da unter anderem ein Großteil der eingesetzten Energie auf dem Weg vom Abflämmgerät (Brenner) zur Pflanze verloren geht (DIERAUER 2000).

Heißwasser- beziehungsweise Heißwasser-Schaum-Systeme werden derzeit ausschließlich im kommunalen oder privaten Bereich der Unkrautbeseitigung auf Parkplatzflächen oder Gehwegen eingesetzt (HUBER und KLEISINGER 2006). Hierfür wird Wasser als Trägerstoff in einem Durchlauferhitzer auf bis zu 95 °C erwärmt und anschließend über eine Lanze großflächig auf die Zielpflanzen ausgebracht (KRISTOFFERSEN 2008). Für eine verbesserte Wirkung kann zusätzlich ein biologisch abbaubarer Isolierschaum ausgebracht werden (RASK 2007). Durch das Übertragen von Wärme werden die Pflanzenzellen auf eine letale Temperatur erhitzt und eine Zerstörung der Zellwand durch Eiweißdenaturierung ab einer Temperatur von 45 °C erwirkt (SUTCLIFFE 1977, LEVITT 1980). In Abhängigkeit von Unkrautart und -dichte sind die Wasseraufwandmengen für eine erfolgreiche Bekämpfung hoch und führen unter Umständen zur Verschlammung und Verkrustung des Bodens (HANSSON und ASCARD 2002). Bei perennierenden Unkräutern ist eine mehrmalige Behandlung erforderlich (DAAR 1994). Ein Einsatz dieser Systeme in Reihenkulturen zur selektiven Unkrautbekämpfung ist – ohne dabei die Kulturpflanze zu schädigen – derzeit aus Gründen mangelnder Präzision, Wirksamkeit und hohen Energieverlusten nicht möglich. Um die Verfahrenskosten deutlich zu reduzieren, muss die Energie zielgerichteter und somit effizienter auf bestimmte Pflanzenorgane emittiert werden.

Am Institut für Landtechnik der Universität Bonn wird zurzeit ein neuartiges und alternatives, thermisches Unkrautbekämpfungsverfahren für den selektiven Einsatz in Reihenkulturen untersucht. Als Trägerstoff werden Pflanzenöle eingesetzt. Öl ist im Vergleich zum Trägerstoff Wasser für eine thermische Unkrautbekämpfung deutlich vorteilhafter, da es auf Temperaturen von bis zu 300 °C erwärmt werden kann (BHATIA et al. 1990). Mithilfe einer Spritzapplikation soll heißes Pflanzenöl präzise auf einzelne Unkrautpflanzen ausgebracht werden. Durch die günstigen thermophysikalischen und fluidmechanischen Eigenschaften der Öle können diese schnell und effizient Wärmeenergie aufnehmen und auf die Pflanzenorgane übertragen. Durch eine geringe Oberflächenspannung können sich Öle zudem besonders gut an Pflanzenoberflächen anlagern (HEINI 2012).

Aufgrund der Umweltverträglichkeit der Öle aus nachwachsenden Rohstoffen und als mögliches Substitut für synthetische Herbizide bietet dieses thermische Unkrautbekämpfungsverfahren eine Perspektive sowohl für den Einsatz im konventionellen als auch im Ökologischen Landbau und trägt somit zu einer nachhaltigeren Agrarproduktion bei.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist, geeignete Pflanzenöle zu ermitteln sowie eine Laborapplikationseinrichtung zu entwickeln, die ein effizientes Erwärmen und präzises Applizieren ermöglicht, um in nachfolgenden Versuchen eine deutliche Schädigung ackertypischer Unkrautpflanzen zu erwirken. In einem ersten Schritt sollen technische Einflussparameter wie beispielsweise Fallhöhe, Öltemperatur, Tropfengröße und Anlagerungsverhalten bei einer Heißölapplikation untersucht sowie eine wirtschaftliche Bewertung bezogen auf Energieeinsatz, Aufwandmenge und Bekämpfungserfolg durchgeführt werden.

Material und Methoden

Auswahl geeigneter Pflanzenöle

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden annähernd 100 Pflanzenöle mithilfe von Literaturangaben auf ihre physikalischen Eigenschaften geprüft und für ihren möglichen Einsatz als Wärmeträger bewertet. Dabei ist eine Eignung von Pflanzenölen für die thermische Unkrautbekämpfung von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Ein wesentliches Kriterium ist die Herstellungsweise. Grundsätzlich kann zwischen kaltgepressten und raffinierten Pflanzenölen unterschieden werden. Raffinierte Öle haben den Vorteil, dass durch den Raffinationsprozess unerwünschte Begleitstoffe wie beispielsweise Pigmente, Geruchs-, Geschmacks- oder Schleimstoffe entfernt werden, was zu einer Erhöhung der Rauchpunkt-Temperatur führt (WIDMANN 1994). Der Rauchpunkt liegt bei raffinierten Ölen im Vergleich zu den unraffinierten Ölen häufig bei über 150 °C und ermöglicht somit ein Erwärmen auf hohe Endtemperaturen, ohne dass sich über den Ölen eine Rauchbildung entwickelt. Zwei weitere, wichtige Kriterien bei der Auswahl geeigneter Pflanzenöle sind ihre Viskosität und Dichte. Für eine erfolgreiche Spritzapplikation müssen die verwendeten Öle auch bei niedrigeren Temperaturen über günstige Fließeigenschaften verfügen und dürfen bei Raumtemperatur nicht erstarren, da ansonsten Düsen und Ventile der Applikationseinrichtung verkleben könnten.

Zur Bestimmung der Viskosität von Pflanzenölen bei unterschiedlichen Temperaturen wurden für ausgewählte Öle Viskositäts-Temperatur-Profile im Bereich von 0–250 °C mithilfe eines Kegel-Scheiben-Rheometers in Auftrag gegeben. Gleichzeitig wurde mit einem Dichtemessgerät für jedes Pflanzenöl ein Dichte-Temperatur-Profil angefertigt, um die Änderung der Dichte bei steigender Temperatur aufzuzeigen.

Aus der Literatur wurden darüber hinaus die spezifischen Wärmekapazitäten ausgewählter Pflanzenöle ermittelt. Eine hohe Wärmekapazität erlaubt, dass das Fluid viel Wärmeenergie speichern und während der Applikation auf die Pflanzenoberfläche abgeben kann (KUCHLING 2010). Dies bedeutet jedoch, dass ein schnelles Aufheizen der verwendeten Flüssigkeit mit steigender Wärmekapazität energie- und zeitintensiver wird.

Für die Verwendung zur Spritzapplikation sind daher Öle mit hohen Wärmekapazitäten und Rauchpunkten von > 150 °C für eine thermische Unkrautbekämpfung besonders vorteilhaft.

Neben den thermophysikalischen und fluidmechanischen Eigenschaften sind aber auch wirtschaftliche und ökologische Faktoren wie beispielsweise Kaufpreis, Verfügbarkeit, Herkunft und biologische Abbaubarkeit im Boden mit in die Auswahl geeigneter Pflanzenöle einzubeziehen. Aus Gründen der Nachhaltigkeit sollen die Pflanzenöle möglichst aus heimischem Anbau stammen und einen Preis von 5 € pro Liter nicht überschreiten, um die Kosten des Verfahrens gering zu halten.

Experimentelle Bestimmung des Aufwärmverhaltens von Pflanzenölen im Vergleich zu Wasser

Ergänzend zur Literaturrecherche wurden experimentelle Untersuchungen zum Erwärmungsverhalten von Raps- und Sonnenblumenöl im Vergleich zu Wasser durchgeführt. Hierfür wurden auf einem Magnetrührer (IKAMAG REC-G, IKA GmbH & Co. KG) jeweils 100 ml Flüssigkeit in einem Becherglas auf höchster Heizstufe erwärmt und die Temperaturzunahme mithilfe eines Temperaturfühlers (Pt100, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH) gemessen. Während Wasser bis zum Siedepunkt erwärmt wurde, konnten beide Öle bis zum Erreichen ihres Rauchpunktes bei etwa 220 °C unter dem Abzug aufgeheizt werden. Um den Aufheizvorgang auch energetisch bewerten zu können, wurde die

zum Erwärmen der Flüssigkeiten aufgewendete Energie abgeschätzt. Die Abschätzung der aufgenommenen Wärmemenge ΔQ (in J) beim Erhitzen der Flüssigkeiten erfolgte nach Gleichung 1:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{Gl. 1}$$

mit der Masse m in kg, der spezifischen Wärmekapazität c in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ sowie der Temperaturänderung ΔT in K. Bei der Berechnung der Wärmeaufnahme muss berücksichtigt werden, dass die spezifische Wärmekapazität c von Wasser und Pflanzenöl temperaturabhängig ist. Die in der Berechnung verwendeten Werte sind nur für die Temperatur von 25 °C gültig, die Abweichungen bei anderen relevanten Temperaturen können jedoch für die weiteren Berechnungen vernachlässigt werden.

Entwicklung eines Laborversuchsstandes

Neben der Auswahl geeigneter Pflanzenöle ist die Entwicklung und technische Erprobung eines Laborversuchsstandes zur thermischen Unkrautbekämpfung ein weiterer Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit.

Der in Abbildung 1 dargestellte Laborapplikationsstand setzt sich im Wesentlichen aus einer elektrisch beheizten Hohlpatrone (Abbildung 2), bestehend aus einem Messingrohr (L = 100 mm, D = 14 mm) mit integrierter, massearmer Hochleistungs-Rohrpatrone als Heizelement (U = 230 V) mit eingebautem Thermoelement, zusammen. Diese Heiztechnik findet in der Klebstoffindustrie für das Erwärmen von Düsen und Heißkanalwerkzeugen Verwendung und musste daher für die angestrebten Versuchszwecke (Erwärmen von Pflanzenöl) durch einen inneren Messingzylinder modifiziert werden.

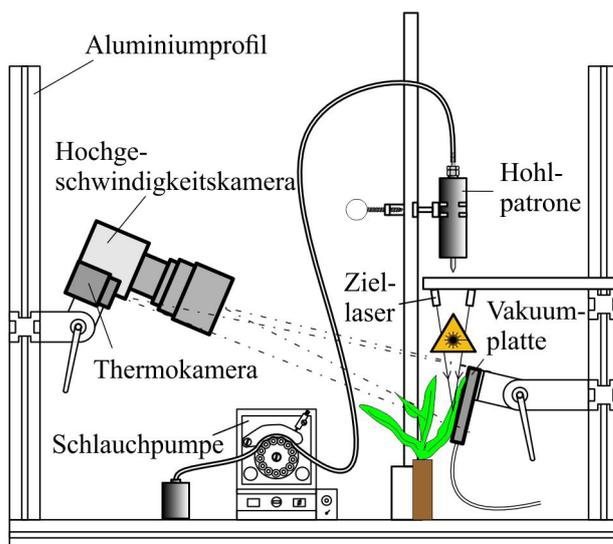


Abbildung 1: Laborapplikationsstand mit Hohlpatrone (schematisch)

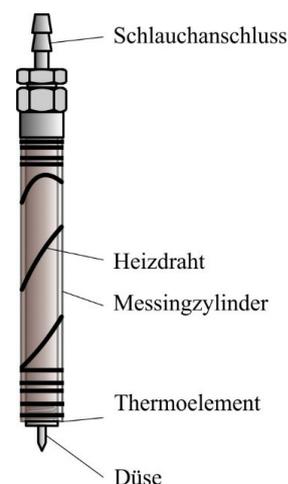


Abbildung 2: Aufbau der verwendeten Hohlpatrone (schematisch)

Mithilfe einer selbst entwickelten, separaten Steuereinheit können Flüssigkeiten in 1-Grad-Schritten auf Temperaturen bis zu 400 °C erwärmt und die tatsächliche Temperatur über das am unteren Ende der Hohlpatrone fest eingebaute Thermoelement gemessen werden. Für die Laborversuche mit Pflanzenölen wurde die Heiztemperatur aus Sicherheitsgründen auf 250 °C begrenzt. Ein Gewinde im inneren Messingzylinder ermöglicht das Einschrauben unterschiedlicher Applikationsdüsen, die so auch auf ihre Eignung als Einzeltropfendüse getestet werden können. Über die Wahl der Düsenform und des Lochdurchmessers kann die Tropfengröße beeinflusst werden.

Die Dosierung des Pflanzenöls erfolgt über eine vorgeschaltete, elektrisch angetriebene, pulsationsarme Peristaltikpumpe (Perimax 12, Spetec GmbH), welche das Pflanzenöl über einen hitzestabilen Silikonschlauch aus einem Vorratsbehälter mit einem Druck < 1.500 hPa von oben in den Messingzylinder der Hohlpatrone fördert. Das Volumen des Messingzylinders beträgt 6 cm³ und ermöglicht das Aufheizen um bis zu 230 K im Durchlauf, bei einer Abgabemenge < 10 ml min⁻¹. Um ein zuvor definiertes Volumen reproduzierbar dosieren zu können, welches sich aus dem Schlauchinnendurchmesser, der Anzahl der Schlauchpumpenrollen sowie deren Umlaufgeschwindigkeit ergibt, wurde die Steuerung der Peristaltikpumpe modifiziert.

Durch den stufenlos einstellbaren Geschwindigkeitsbereich der Pumpe (von 1 bis 80 U min⁻¹) und der Verwendung verschiedener Schlauchdurchmesser (von 0,1 bis 3,1 mm) können Fördermengen von 0,004 bis 40 ml min⁻¹ sowie die Dosierung einzelner Tropfen, ohne die Verwendung eines Düsenschaltventils, realisiert werden. Problematisch ist jedoch das Fördern von sehr kaltem beziehungsweise hoch viskosem Pflanzenöl. Erst ab einer Viskosität < 80 mPa · s (Abbildung 4) ist das Fördern kleiner Volumeneinheiten mit einer Peristaltikpumpe und geringen Schlauchinnendurchmessern (< 0,5 mm) problemlos möglich. Zur Verringerung der Viskosität unter den Schwellenwert von 80 mPa · s müssen Pflanzenöle bei Temperaturen < 10 °C im Vorratsbehälter zumeist erst vorgewärmt werden.

Damit das Öl auf bestimmte Bereiche der Pflanzenoberfläche exakt senkrecht appliziert werden kann, sind zum besseren Anvisieren zwei Linienlaser in einem Winkel von 90° und einem Abstand von 120 mm zueinander verbaut (Abbildung 1).

Auf einer 100 x 50 mm großen Vakuumplatte (Abbildung 1) können Pflanzenblätter mithilfe von Unterdruck schonend fixiert und das Anlagerungsverhalten pflanzlicher Öle bei unterschiedlichen Blattstellungen getestet werden. Um Beschädigungen der Blattoberfläche zu vermeiden, kann der Unterdruck über ein mechanisches Drosselventil im Bereich von 10 bis 200 hPa geregelt werden.

Zusätzlich ist auf dem Laborversuchsstand an einer Gelenkhalterung eine Thermokamera (PI 160, Optris GmbH) montiert, mit der die Temperatur und das Abkühlverhalten von Öltropfen im Flug wie auch auf der Pflanzenoberfläche berührungslos mit einer maximalen Abweichung von 2 °C gemessen werden können. Hierdurch können Erkenntnisse zum Abkühlverhalten von Pflanzenölen in Abhängigkeit der Ausgangstemperatur, der Ölaufwandmenge, der Fallhöhe, der Pflanzenoberfläche sowie der Blattstellung gewonnen werden. In experimentellen Versuchen wurde Rapsöl im Laborversuchsstand auf 100 und 250 °C erwärmt und sowohl Einzeltropfen als auch Tropfenserien durch das gezielte Ansteuern der Peristaltikpumpe mittels Handtaster auf Pflanzenoberflächen appliziert. Die Messergebnisse wurden durch den jeweiligen Mittelwert der zehnfachen Wiederholung in einem Liniendiagramm abgebildet (Abbildung 8 und 9).

Eine Hochgeschwindigkeitskamera (HotShot 1280, NAC Image Technology) ermöglicht genauere Untersuchungen zum Flugverhalten der Öltropfen sowie deren Aufprall- und Anlagerungsverhalten auf den verwendeten Pflanzenoberflächen.

Alle Komponenten des Laborversuchsstandes sind über ein 40 x 40 mm Alu-Profilschienensystem miteinander verbunden und lassen sich dadurch einfach und variabel in ihrer Position verändern.

Ergebnisse

Besondere Eignung von Raps- und Sonnenblumenöl

Die Untersuchung der verwendeten Öle hat ergeben, dass sowohl Raps- als auch Sonnenblumenöl besonders für eine Heißölapplikation geeignet sind. Aufgrund des Herstellungsverfahrens durch Raffination können beide Öle > 220 °C ohne Rauchbildung erwärmt werden, was essenziell für die thermische Unkrautbekämpfung ist. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Eigenschaften von raffiniertem Raps- und Sonnenblumenöl im Vergleich zu einem unraffinierten und ungeeigneten Walnussöl (exemplarisch) zusammengefasst. Raps- und Sonnenblumenöl werden europaweit in ausreichender Menge nachhaltig produziert, was sich unter anderem positiv auf den Carbon Footprint und den Preis von derzeit < 1,50 € pro Liter bei Abnahmemengen > 1.000 l auswirkt. Dagegen weist Walnussöl, wie die meisten anderen kaltgepressten Pflanzenöle, einen signifikant niedrigeren Rauch- beziehungsweise Flammpunkt auf, was für eine Heißölapplikation gänzlich ungeeignet ist. Aufgrund der wenigen inhereuropäischen Anbauggebiete müssten große Mengen an Walnussöl für die thermische Unkrautbekämpfung importiert werden, was aus ökologischer und ökonomischer Sicht (Literpreis > 40 €) nicht sinnvoll wäre.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften, Hauptanbauggebiet und Kosten von raffiniertem Raps- und Sonnenblumenöl sowie unraffiniertem Walnussöl

| | Einheit | Rapsöl raffiniert | Sonnenblumenöl raffiniert | Walnussöl unraffiniert |
|----------------------------|--|----------------------|------------------------------|---------------------------|
| Rauchpunkt | °C | 220 | 225 | 160 |
| Flammpunkt | °C | 317 | 316 | > 200 |
| Viskosität (20/250 °C) | mPas · s | 67/1 | 59/1 | 72/5 |
| Dichte (20/250 °C) | kg · m ⁻³ | 919/765 | 917/756 | 915/773 |
| Spezifische Wärmekapazität | J · kg ⁻¹ · K ⁻¹ | 1970 | 1970 | 1970 |
| Anbauggebiet | | Europa | Europa | Asien/Europa/Amerika |
| Preis | € · l ⁻¹ | < 1,20 | < 1,50 | > 40 |

Pflanzenöle lassen sich im Vergleich zu Wasser signifikant schneller aufheizen

Die experimentellen Erwärmungsversuche mit Wasser (Spezifische Wärmekapazität $c = 4.190 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) sowie Raps- und Sonnenblumenöl (Spezifische Wärmekapazität $c = 1.970 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) haben gezeigt, dass beide Pflanzenöle aufgrund ihrer um 53 % geringeren Wärmekapazität bei gleichem Energieinput ca. 30 % schneller auf eine Temperatur $> 100 \text{ °C}$ gebracht werden können.

In einem Zeitraum von 6 Minuten (Abbildung 3) wurde Wasser ($m = 0,1 \text{ kg}$) von 25 °C auf eine Temperatur von 99 °C erwärmt ($\Delta T = 74 \text{ K}$). Dies entspricht einer Wärmeaufnahme (ΔQ) gemäß Gleichung 1 von 31 kJ. Dagegen erreichten Raps- und Sonnenblumenöl in der gleichen Zeit bereits eine Temperatur von ca. 148 °C bei einer Wärmeaufnahme von 24 kJ.

Das schnelle und im Vergleich zu Wasser um 53 % energieärmere Aufheizen (jeweils $\Delta T = 74 \text{ K}$) und das Erreichen von Temperaturen $> 200 \text{ °C}$ verdeutlicht das Potenzial von Pflanzenöl als Trägerstoff von Wärme für eine thermische Unkrautbekämpfung mittels Spritzapplikation.

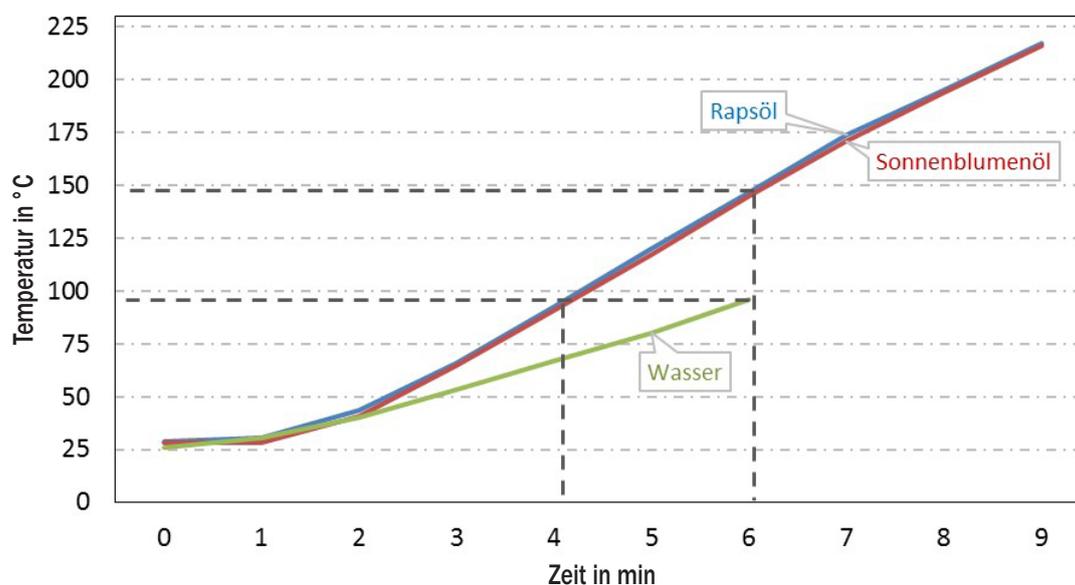


Abbildung 3: Temperaturzunahme von jeweils 100 ml Wasser, Sonnenblumen- und Rapsöl in Abhängigkeit von der Zeit

Während der Aufheizphase von Raps- und Sonnenblumenöl nahm die Dichte jeweils linear von ca. $918 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (bei 20 °C) auf ca. $760 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (bei 250 °C) ab (Ausdehnungskoeffizienten von $0,840 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$). Die durch die Ausdehnung resultierende Volumenzunahme von bis zu 20 % muss unbedingt beachtet werden, um ein Überlaufen bei einem geschlossenen Heizbehältersystem zu vermeiden.

Viskositätsänderung in Abhängigkeit der Temperatur

Während der Aufheizphase sind im Vergleich zu Wasser signifikante Änderungen der Viskosität bei Raps- und Sonnenblumenöl zu verzeichnen. Bei beiden Pflanzenölen nimmt die Viskosität mit zunehmender Temperatur um etwa 98 % von ca. 63 mPa · s (bei 20 °C) auf 1 mPa · s (bei 250 °C) signifikant ab (Abbildung 4).

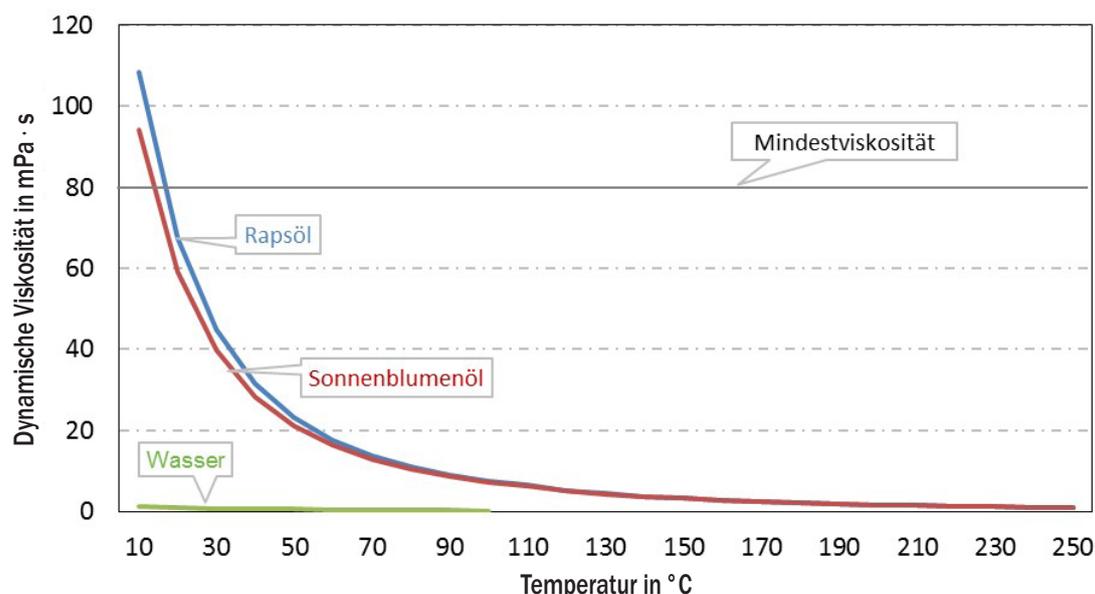


Abbildung 4: Viskositäts-Temperatur-Diagramm von Wasser, Raps- und Sonnenblumenöl

Variable Volumenstromdosierung und Bestimmung der Tropfenenergie

Die experimentellen Versuche haben gezeigt, dass die ausgewählten Pflanzenöle mit der eingesetzten Laborapplikationseinheit im Durchlauf auf Temperaturen von bis zu 250 °C erwärmt werden können. Durch die Ausstattung der Peristaltikpumpe mit einem selbst entwickelten Motorsteuergerät ist es gelungen neben einem Vollstrahl auch einzelne Öltropfen reproduzierbar applizieren zu können, ohne den Einsatz eines Düsenschaltventils. Gleichzeitig konnte bei der Erzeugung von einzelnen Tropfen festgestellt werden, dass die Öltropfen mit abnehmender Viskosität (Temperaturerhöhung) früher von der Düsen Spitze abreißen. Durch das Verwiegen einzelner Tropfen mit einer Feinwaage (Sartorius) bei Temperaturen von 20, 100, 150, 200 und 250 °C unter Berücksichtigung der jeweiligen Dichte konnte nachgewiesen werden, dass das durchschnittliche Tropfenvolumen von 0,017 ml (bei 20 °C) auf 0,011 ml (bei 250 °C) signifikant abnimmt. Folglich können aus 1 ml Pflanzenöl zwischen 58 (bei 20 °C) und 90 Öltropfen (bei 250 °C) generiert werden.

Neben dem Tropfenvolumen hat auch die Energiemenge, die in einem einzelnen Tropfen enthalten ist, einen wesentlichen Einfluss auf den Bekämpfungserfolg. Unter Beachtung der abnehmenden Dichte beträgt die abzugebende thermische Energie eines einzelnen Pflanzenöltropfens gemäß Gleichung 1 zwischen 2,8 J ($\Delta T = 130$ K) und 4,1 J ($\Delta T = 230$ K), die bei einer wärmewirksamen Applikation auf Unkrautpflanzen bei Raumtemperatur (20 °C) theoretisch übertragen werden kann.

Entwicklung von Applikationsdüsen

Neben der Viskosität hat auch die Form der Applikationsdüse einen wesentlichen Einfluss auf das Abtropfverhalten von Pflanzenölen. Bei der Entwicklung und experimentellen Erprobung unterschiedlicher Düsenbauformen hat sich eine längliche ($L > 10$ mm) und möglichst spitz zulaufende Düsenform mit Lochdurchmessern zwischen 0,2 und 0,3 mm als besonders geeignet für die Einzeltropfenbildung bei erhitztem Pflanzenöl erwiesen (Nr. 6, Abbildung 5). Der Wärmeverlust beläuft sich auf Grund der länglichen Düsenform auf ca. 4 % ($T = 250$ °C) im Vergleich zu einer flachen Düse. Mithilfe von Detailaufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera konnte festgestellt werden, dass Öltropfen bei einer kurzen, abgeflachten (Nr. 1, Nr. 2, Nr. 4, Abbildung 5) oder konkaven Applikationsdüse (Nr. 3, Abbildung 5) im Vergleich zu einer spitz zulaufenden Düse (Nr. 5, Abbildung 5) schlechter abreißen und es zu einer Nachtropfenbildung kommt (Abbildung 6). Darüber hinaus begünstigen diese Düsenformen ein ungewolltes „Hochwandern“ einzelner Tropfen entlang des Düsenchaftes in Richtung Hohlpatronenboden und die dortige Bildung eines kumulierenden Öltropfens, der unkontrolliert abreißt (Abbildung 7).

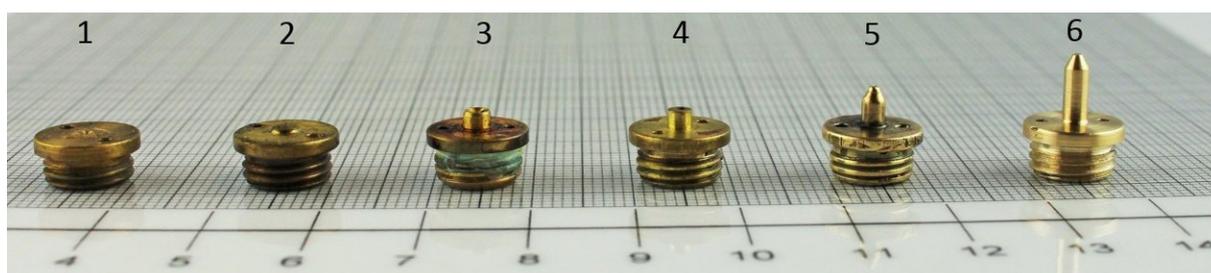


Abbildung 5: Entwicklungsschritte einer geeigneten Applikationsdüse

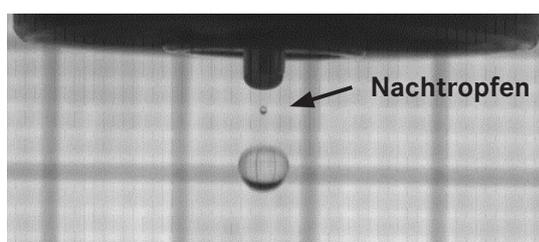


Abbildung 6: Kurze, konkave Düse mit Nachtropfen

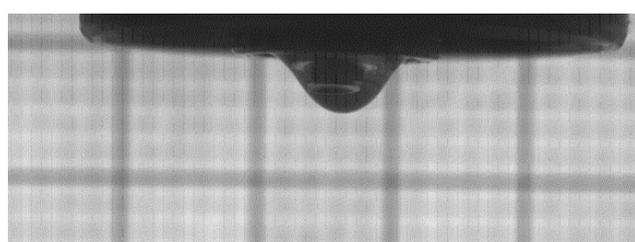


Abbildung 7: Anlagerung eines Öltropfens am Hohlpatronenboden

Bestimmung des Abkühlverhaltens

Messungen mit der Thermokamera ergaben, dass einzelne Pflanzenöltropfen beim Austritt aus der Applikationsdüse sowie nachfolgend im freien Fall bis zu 70 % gegenüber ihrer ursprünglichen Temperatur (im Inneren der Hohlpatrone) verlieren. Ursache hierfür ist die geringe Masse eines einzelnen Öltropfens von ca. 0,009 g ($T = 250$ °C) in Verbindung mit einer vergleichsweise großen Oberfläche von etwa 0,24 mm², die beim Kontakt mit der Umgebungsluft (25 °C) eine schnelle Abkühlung bedingen. Die Tropfen kühlen äußerlich deutlich stärker ab als im Kern.

Für eine erfolgreiche, thermische Unkrautbekämpfung durch Eiweißdenaturierung muss eine möglichst lange Wärmeübertragung ($T > 45\text{ °C}$) über einen Zeitraum von mindestens 2 Sekunden auf die Unkrautpflanze erfolgen. Dabei ist die Dauer der Wärmeeinwirkung für eine letale Schädigung abhängig von der Flüssigkeitstemperatur und der Pflanzengröße (VIRBICKAITE et al. 2006).

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass ein auf 250 °C erwärmter Rapsöltropfen (blauer Graph) auf seinem Weg zur Pflanzenoberfläche (Fallhöhe 15 cm, 20 °C Umgebungstemperatur) auf 80 °C abkühlt und somit annähernd 68 % seiner Ausgangstemperatur verliert. Dennoch reicht diese Temperatur aus, um über einen Zeitraum von ca. 12 Sekunden das pflanzliche Gewebe zu schädigen, bevor sich das Öl auf unter 45 °C abkühlt und damit eine weitere Eiweißdenaturierung nicht mehr stattfindet.

Der rote Graph (Abbildung 8) zeigt das Abkühlverhalten eines auf nur 100 °C erwärmten Rapsöltropfens. Dieser verliert im freien Fall etwa 40 % seiner Ausgangstemperatur, was 60 °C Flüssigkeitstemperatur auf der Pflanzenoberfläche entspricht. Weniger als 6 Sekunden lang kann das Rapsöl bei dieser Temperaturvariante pflanzenschädigende Wärmeenergie übertragen, ehe die Flüssigkeitstemperatur auf unter 45 °C absinkt.

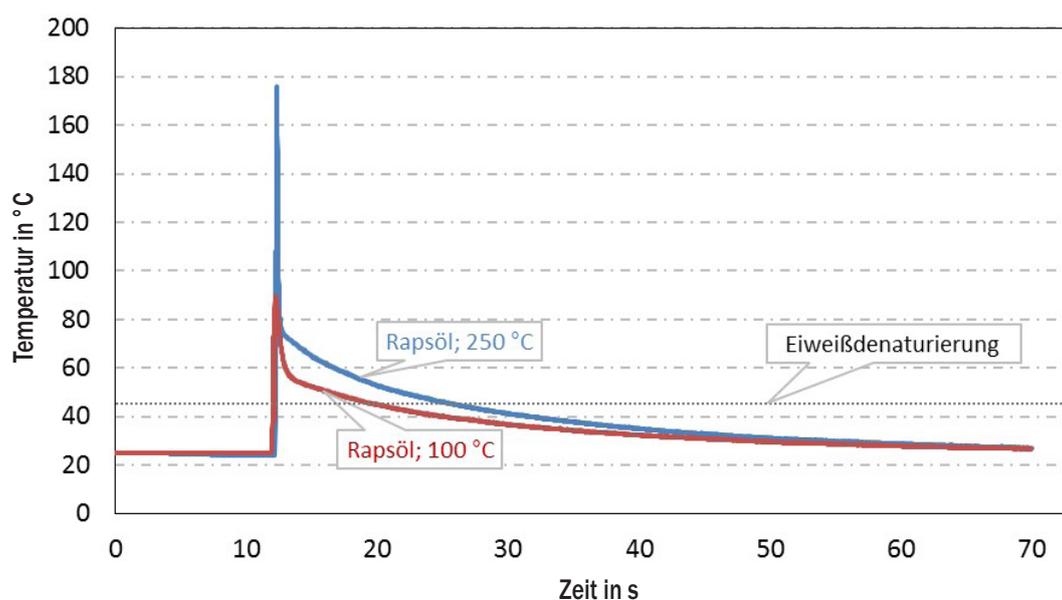


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Temperatur von Rapsöl nach dem Austreten aus der Düse sowie während und nach der Applikation (1 Tropfen, 15 cm Fallhöhe)

Abbildung 9 zeigt die gleiche Versuchsanlage wie in Abbildung 8, jedoch mit einer um das 5-Fache gesteigerten Ölaufwandmenge in Form von schnell aufeinanderfolgenden Einzeltropfen. Dies führt zu einer signifikant ansteigenden Temperaturerhöhung auf der Pflanzenoberfläche durch einen tropfenweise, gesteigerten Eintrag von Wärmeenergie. Infolge der Summierung der Einzeltropfenenergie, insbesondere der im Vergleich zur Außenhülle erhöhten Tropfenkerntemperatur, kommt es zu einem verzögerten Abkühlungsprozess, wodurch eine länger anhaltende und deutlich intensivere Pflanzenschädigung bewirkt werden kann.

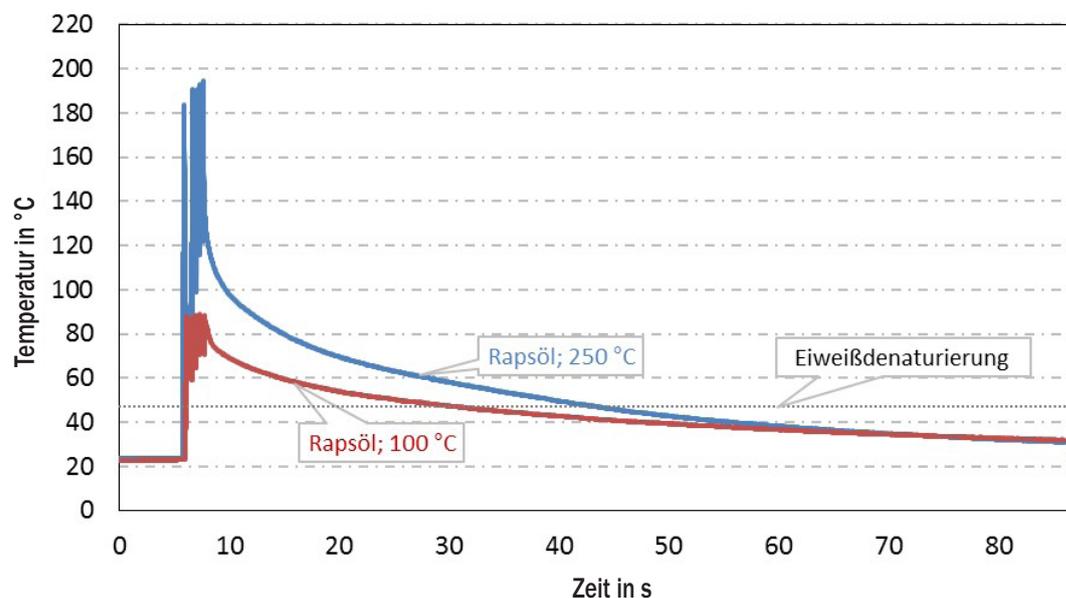


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Temperatur von Rapsöl nach dem Austreten aus der Düse sowie während und nach der Applikation (5 Tropfen, 15 cm Fallhöhe)

Bei einer Ausgangstemperatur von 250 °C (Abbildung 9, blauer Graph) beträgt der Temperaturverlust des fünften Tropfens bis zum Auftreffen auf die Pflanzenoberfläche nur noch 52 %. Es dauert ca. 35 Sekunden bevor die Öltemperatur auf der Zieloberfläche unter 45 °C abfällt. Im Gegensatz dazu beträgt die unkrautschädigende Verweildauer von Pflanzenöl bei einer Ausgangstemperatur von 100 °C (Abbildung 9, roter Graph) mit einem Temperaturverlust im freien Fall von ca. 30 % ca. 18 Sekunden.

Schlussfolgerungen

Das Erwärmen von Pflanzenölen auf Temperaturen bis zu 250 °C ist mit der am Institut für Landtechnik entwickelten Laborapplikationseinrichtung möglich. Experimentelle Versuche haben gezeigt, dass Raps- und Sonnenblumenöl auf Grund ihrer thermophysikalischen, fluidmechanischen und ökonomischen Eigenschaften besonders für eine Heißölapplikation geeignet sind. Um die hohen Temperaturverluste bei der Applikation geringer Flüssigkeitsmengen auf Unkrautpflanzen auszugleichen, müssen die Öle auf mehr als 150 °C erhitzt werden. Hierfür eignet sich vor allem das dezentrale Erwärmen mittels einer Hohlpatrone unmittelbar vor der Düse. Diese sollte für ein störungsfreies Dosieren von Einzeltropfen möglichst lang und spitz sein. Durch eine optimierte Steuerungstechnik können mit einer Peristaltikpumpe Flüssigkeitsmengen von 0,004 bis 40 ml min⁻¹ exakt dosiert und auf Unkrautpflanzen gezielt appliziert werden. Die Nutzung einer Thermokamera ermöglicht ein genaues Messen der Pflanzenöltemperatur sowohl im freien Fall als auch auf der Pflanzenoberfläche.

In Laborversuchen konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Ölaufwandmenge und Öltemperatur bezogen auf die Dauer der Wärmeeinwirkung hergestellt werden. Eine ökonomische Bewertung kann allerdings erst nach der Gewinnung weiterer Parameter erfolgen.

Erste Versuche an ackertypischen, dikotylen Unkräutern haben gezeigt, dass die Applikation in das Wachstumszentrum der Pflanzen eine letale Schädigung verursacht und daher besonders geeignet für eine thermische Unkrautbekämpfung mit heißen Ölen ist. In zukünftigen Untersuchungen

an verschiedenen monokotylen und dikotylen Ackerunkräutern (Ackerfuchsschwanz, Weidelgras, Löwenzahn, Hirtentäschel, Kornblume usw.) soll der Einfluss von Ölaufwandmenge in Abhängigkeit der Öltemperatur und Fallhöhe auf den Bekämpfungserfolg durch eine Heißölapplikation untersucht werden. Dabei stehen besonders das Pflanzenalter (Keimblatt-, Zweiblatt-, Vierblattstadium) und der Applikationsort (Blattfläche, Stängel, Wachstumszentrum) im Fokus der geplanten Untersuchungen. Mithilfe dieser Erkenntnisse soll das gesamte Verfahren hinsichtlich seiner Effektivität und daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten in der Landwirtschaft bewertet werden.

Literatur

- Bertram, A. (1996): Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Dissertation, TU München, Institut für Landtechnik (Freising-Weihenstephan)
- Bhatia, V. K.; Chaudhry, A.; Sivasankaran, G. A.; Bisht, R. P. S.; Kashyap, M. (1990): Modification of jojoba oil for lubricant formulations. *Journal of the American Oil Chemists Society* 67, pp.1–7
- Daar, S. (1994). New technology harnesses hot water to kill weeds. *IPM Practitioner* 16, pp. 1–5
- Dierauer, H. (2000): Merkblatt Abflammen. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), S. 1–4
- Diver, S. (2002): Flame Weeding for Vegetable Crops. *Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA)*, pp.1–16
- Hansson, D.; Asacard, J. (2002). Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control. *Weed Research* 42, pp. 307–316
- Heini, J. (2012): Studies on the efficacy, composition and mode of action of an ethoxylated soybean oil adjuvant for herbicides. Dissertation, Universität Hohenheim
- Heitefuss, R. (2000): Pflanzenschutz: Grundlagen der praktischen Phytomedizin. Stuttgart; New York, Thieme
- Huber, B.; Kleisinger, S. (2006): Umweltgerechte thermische Unkraut- und Vegetationsregulierung. Abschlussbericht, BMBF Förderkennzeichen 0330120A
- Koch, W. (1967): Untersuchungen zur Konkurrenzwirkung von Kulturpflanzen und Unkräutern aufeinander. *Weed Research* 7, S. 22–28
- Kristoffersen, P.; Rask, A. M.; Larsen, S. U. (2008). Non-chemical weed control on traffic islands: a comparison of the efficacy of five weed control techniques. *Weed Research* 48, pp. 124–130
- Kuchling, H. (2010): Taschenbuch der Physik. München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Levitt, J. (1980): Responses of Plants to Environmental Stresses. Vol. 1. Chilling, Freezing, and High Temperature stresses, New York, Academic Press, pp. 347–447
- Rask, A. M.; Kristoffersen, P. (2007): A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Research* 47, pp. 370–380
- Sutcliffe, J. (1977): Plants and Temperature. *The Institute of Biology's Studies in Biology* 86. London, Edward Arnold
- Virbickaite, R.; Sirvydas, A. P.; Kerpauskas, P.; Vasinauskiene, R. (2006): The comparison of thermal and mechanical systems of weed control. *Agronomy Research* 4, pp. 451–455
- Widmann, B. A. (1994): Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen – Einflussfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozess. „Gelbes Heft“ Nr. 51, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Referat Landmaschinenwesen und Energiewirtschaft, München

Autoren

M. Sc. Jürgen Peukert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers** ist Inhaber des Lehrstuhls „Systemtechnik in der Pflanzenproduktion“ und **Dr.-Ing. Lutz Damerow** ist wissenschaftlicher Oberassistent am Institut für Landtechnik der Universität Bonn, Nussallee 5, 53115 Bonn, E-Mail: j.peukert@uni-bonn.de.