

**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn**

**Landwirtschaftliche Fakultät**

**USL**



---

**Lehr- und Forschungsschwerpunkt**

**„Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“**

## **Forschungsbericht**

**Nr. 187**

**Unkrautbekämpfung mit heißen Ölen aus  
nachwachsenden Rohstoffen**

**Verfasser:**

**Jürgen Peukert, Peter Schulze Lammers, Lutz Damerow**

**Institut für Landtechnik**

**Herausgeber:** Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172 15, 53115 Bonn  
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776  
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-  
Westfalen  
Bonn, 12.2017

ISSN 1610-2460

**Projektleitung:** Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers  
Dr.-Ing. Lutz Damerow

**Projektbearbeiter:** M.Sc. Jürgen Peukert

Institut für Landtechnik  
Nussallee 5  
53115 Bonn

**Zitiervorschlag:**

PEUKERT, J., DAMEROW, L. UND SCHULZE LAMMERS, P. (2017): Unkrautbekämpfung mit heißen Ölen aus nachwachsenden Rohstoffen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 187, 61 Seiten

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Material und Methoden</b> .....	<b>8</b>
2.1 Auswahl geeigneter Pflanzenöle .....	8
2.2 Entwicklung eines Laborversuchsstandes .....	9
2.2.1 Vorversuche zur Bewertung des Abkühlverhaltens potentieller Trägerflüssigkeiten .....	9
2.2.2 Aufbau einer Laborapplikationseinrichtung .....	10
2.2.3 Softwareentwicklung .....	13
2.3 Untersuchung des Anlagerungsverhaltens auf der Pflanzenoberfläche .....	13
2.4 Auswahl und Anzucht von Ackerunkräutern im Versuchsgewächshaus .....	15
2.4.1 Auswahl potentieller Ackerunkräuter .....	15
2.4.2 Anzucht potentieller Ackerunkräuter im Versuchsgewächshaus .....	17
2.5 Durchführung der Applikationsversuche mit anschließender Bonitur .....	19
2.6 Wirtschaftliche Bewertung der Heißölapplikation .....	20
2.7 Ökologische Bewertung des Abbauverhaltens im Oberboden .....	21
2.8 Optimierung der Applikationseinrichtung .....	23
<b>3. Ergebnisse</b> .....	<b>24</b>
3.1 Besondere Eignung von Raps- und Sonnenblumenöl .....	24
3.2 Dosiergenauigkeit der Peristaltikpumpe .....	27
3.2.1 Entwicklung geeigneter Düsen für die Heißölapplikation .....	28
3.2.2 Bestimmung der Energiemenge von Öltropfen .....	30
3.2.3 Abkühlverhalten von Pflanzenöl im freien Fall .....	31
3.3 Erste Laborapplikationsversuche mit heißem Pflanzenöl .....	33
3.4 Anlagerungsverhalten auf der Pflanzenoberfläche .....	34
3.5 Heißölapplikation an ausgewählten Unkräutern .....	35
3.5.1 Einfluss der Pflanzenklasse auf den Bekämpfungserfolg .....	35
3.5.2 Einfluss des Pflanzenalters auf den Bekämpfungserfolg .....	38
3.5.3 Einfluss der Aufwandmenge auf den Bekämpfungserfolg .....	41

3.5.4 Einfluss der Öltemperatur auf den Bekämpfungserfolg .....	42
3.6 Wirtschaftliche Bewertung der Heißölapplikation .....	44
3.7 Abbauverhalten von Pflanzenölen im Oberboden.....	46
3.8 Optimierung der Laborversuchseinrichtung für eine gepulste Vollstrahlapplikation ....	49
<b>4. Zusammenfassung.....</b>	<b>54</b>
<b>5. Schlussfolgerung für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Kurzfassung .....</b>	<b>57</b>
<b>7. Abstract.....</b>	<b>58</b>
<b>8. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>59</b>
<b>9. Anhang .....</b>	<b>61</b>
9.1 Mitteilung über evtl. schützenswerte Nutzungsrechte.....	61
9.2 Liste über Veröffentlichungen.....	61
9.3 Liste über Vorträge .....	61
9.4 Liste über Pressemitteilungen.....	61
9.5 Liste über Posterpräsentationen, Vorführungen und Demonstrationen.....	61

## 1. Einleitung

Der zunehmende Druck den chemischen Pflanzenschutzmitteleinsatz zu reduzieren oder gar gänzlich zu verbieten, veranlasst die Agrartechnik nach neuen Wegen beziehungsweise Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz zu suchen. In Folge dessen wird im Präzisionspflanzenschutz, ein Teilbereich des Präzisionspflanzenbaus (Dillon *et al.*, 2007), nach Möglichkeiten gesucht die Aufwandmenge von Pflanzenschutzmitteln durch beispielsweise eine teilschlagspezifische Ausbringung deutlich zu reduzieren (Gerhards *et al.*, 2006) oder andere nicht chemische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen wie beispielsweise mechanische oder thermische Methoden zur Unkrautregulierung weiterzuentwickeln.

### **Mechanische Unkrautbekämpfungssysteme**

Die Grenzen von (inter-row) mechanisch arbeitenden Unkrautbekämpfungssystemen und ihre möglichen Arbeitsgeschwindigkeiten wurden von MERFIELD und BOND (Merfield, 2000; Bond *et al.*, 2003) dargestellt. Die Qualität der Unkrautbekämpfung hängt dabei sehr stark von der Geräteeinstellung und Lenkgenauigkeit des Trägerfahrzeuges sowie der Reihentreue der Kulturpflanzen ab. Die Lenkung der eigentlichen Werkzeuge erfolgt bisher manuell durch eine zusätzliche Arbeitskraft. In den letzten Jahren werden zunehmend Bildverarbeitungssysteme zur Lenkung der Werkzeuge eingesetzt, die entweder den gesamten Rahmen oder einzelne Werkzeuge steuern. Damit konnten zwar größere Fahrgeschwindigkeiten (bis zu  $15 \text{ kmh}^{-1}$ ) und eine verbesserte Arbeitsqualität erreicht werden, aber der Bereich zwischen den Kulturpflanzen (intra-row) wird nicht bearbeitet. Aufgrund dieser Einschränkung wurde nach Möglichkeiten gesucht auch den intra-row Bereich zu bearbeiten. Die Mechanisierung dieser Arbeit ist jedoch aufgrund der hohen Anforderungen an die Arbeitsgeschwindigkeit, den Schutz der Kulturpflanzen und der variablen Pflanzenabstände sehr komplex. Zwei verschiedene Ansätze zur Lösung des Problems wurden angestrebt: der Einsatz passiver bzw. der Einsatz aktiver Werkzeuge.

Zu den passiv arbeitenden Werkzeugen, die auch kommerziell verfügbar sind, gehören Fingerräder/-bürsten und Federzinken aber auch Striegel, die direkt in der Pflanzenreihe arbeiten. Die Arbeitsqualität ist sehr unterschiedlich, häufig nicht befriedigend und es besteht die Gefahr, dass die Kulturpflanzen beschädigt werden. Aktiv im intra-row Bereich arbeitende Systeme wurden und werden in verschiedenen Ländern konzipiert und entwickelt. All diese Systeme sollen selektiv arbeiten. Dabei wird in Abhängigkeit von einem Erkennungssystem, das eine Unterscheidung von Nutzpflanze und Unkrautpflanze ermöglichen soll, das eigentliche Bearbeitungswerkzeug aktiviert (Åstrand, 2002, 2005; Griepentrog, 2005; Rasmussen, 2008). All diese Systeme benötigen aufgrund ihrer mechanischen Arbeitsweise eine Schutzzone um die Pflanze, bearbeiten aber bis zu 95 % der Fläche. Je nach technischer Lösung erfordern diese

Systeme einen Mindestabstand zwischen den Kulturpflanzen und können nicht auf Fehlstellen in der Pflanzenreihe reagieren.

### **Thermische Unkrautbekämpfungssysteme**

Für die thermische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen wurden bereits unterschiedliche Verfahren entwickelt a) Führung eines Brenners und Verbrennung eines Gases zwischen den Pflanzenreihen (inter-row) (Hoffmann, 1989; Bertram, 1996; Astatkie *et al.*, 2007; Raffaelli *et al.*, 2011), b) Applikation von Heißwasser (Hansson & Ascard, 2002; Hansson & Mattsson, 2003), Heißschaum (Huber & Kleisinger, 2006) oder Heißdampf (Leon & Ferreira, 2008). Grundlage dieser Verfahren ist immer das Erwärmen der Pflanzenorgane auf eine Temperatur  $> 45\text{ °C}$  (Levitt, 1980). Ab dieser Temperatur denaturieren die pflanzlichen Eiweiße und es kommt zu einer irreversiblen Zerstörung der Pflanzenzellen. Die notwendige Dauer des letalen Wärmeeintrages variiert stark und hängt im Wesentlichen vom Pflanzenalter und der Höhe des Wärmeeintrages ab (Ascard, 2007). DANIELL *et al.* fand heraus, dass eine erfolgreiche Eiweißdenaturierung ab einer Einwirkzeit von 0,065 Sekunden erfolgt (Daniell *et al.*, 1969). Die Nutzung eines Brenners, Standardverfahren der thermischen Unkrautbekämpfung, insbesondere im Organischen Landbau (Diver, 2002), kann entweder flächendeckend im Voraufbau oder inter-row bei gleichzeitig großem Abstand zu den Kulturpflanzen erfolgen. Verschiedene Optimierungsbemühungen zeigen, 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). Auch bei diesem Verfahren ist eine Schutzzone zur Kulturpflanze notwendig. In der Regel ist diese sogar größer als bei der mechanischen Unkrautbekämpfung. Abflämmverfahren werden bisher nur unselektiv über die gesamte Fläche bzw. inter-row eingesetzt. Somit entstehen relativ hohe Kosten für das Gas. Für eine selektive Bekämpfung des Unkrautes, insbesondere einzelner Unkrautpflanzen oder Unkrautnester, ist das Abflämmen wenig geeignet, da eine verhältnismäßig große Totzeit (lag time) für die effiziente Wirkung vorhanden ist (vorrangig das Zünden des Gases) - bei einer angestrebten Fahrgeschwindigkeit größer  $5\text{ km h}^{-1}$ .

Die notwendige Übertragung von Wärmeenergie zur Schädigung des Pflanzengewebes führte dann auch zu anderen Trägerstoffen wie Wasser und Heißschaum mit den Problemen, dass die Temperatur dieser Trägerstoffe nicht ausreichend angehoben werden kann ( $< 100\text{ °C}$ ) und sie sich aufgrund ihrer Wärmekapazität und ihrer großen Oberfläche schnell abkühlen. Ermittelt wurde, dass der Behandlungserfolg mit zunehmender Flüssigkeitstemperatur steigt (Daniell *et al.*, 1969; Levitt, 1980). Darüber hinaus sind die Wasseraufwandmengen bei diesen Verfahren teilweise sehr hoch und führen unter Umständen zu Verschlammung und Verkrustung des Bodens (Hansson & Ascard, 2002). Vor allem gegen perennierende Unkräuter ist diese

Maßnahme wenig wirkungsvoll (Daar, 1994). Probleme gibt es zudem bei Pflanzen auf denen sich die Wassertropfen nur minimal anlagern können und daher häufig abtropfen beziehungsweise abrollen. Aus diesen Gründen werden Heißwasserverfahren derzeit nur im nichtlandwirtschaftlichen Bereich eingesetzt, beispielsweise zur flächendeckenden Unkrautbekämpfung auf versiegelten Oberflächen im kommunalen Bereich oder für die Unkrautbeseitigung auf Schotter- und Gartenwegen im öffentlichen sowie im privaten Bereich (Huber & Kleisinger, 2006). Gleiches gilt auch für das Übergießen beziehungsweise Überziehen von Unkräutern mit einem Heißschaumgemisch. Bei der Anwendung im Feld muss ein ausreichend großer Abstand zwischen der Kulturpflanze und dem zu bekämpfenden Unkraut eingehalten werden (Schutzzone), was eine präzise und selektive Ausbringung, gerade im intra-row Bereich, erschweren würde.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass im Gegensatz zu den weit verbreiteten und vorrangig eingesetzten chemischen sowie mechanischen Unkrautbekämpfungssystemen thermische Unkrautbekämpfungsverfahren vor allem aus Gründen mangelnder Präzision, Wirksamkeit und hohen Energieverlusten derzeit eher eine Nische besetzen. Diese haben jedoch entscheidende Vorteile vor allem in Bezug auf den Umweltschutz.

### **Entwicklung eines neuartigen Unkrautbekämpfungsverfahrens**

Am Institut für Landtechnik der Universität Bonn wird daher an einem neuartigen und alternativen, thermischen Unkrautbekämpfungsverfahren für den selektiven Einsatz in Reihenkulturen gearbeitet. Als Trägerstoff sollen unterschiedliche Pflanzenöle aus nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt werden. 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). Mit Hilfe 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.

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

Ziel dieses Forschungsprojektes war, geeignete Pflanzenöle zu ermitteln und diese mit Hilfe einer Laborversuchseinrichtung effizient zu erwärmen und möglichst präzise zu applizieren um eine deutliche Schädigung ackertypischer Unkrautpflanzen zu erwirken. Darüber hinaus sollen die technischen und pflanzlichen Einflussparameter bei einer Heißölapplikation untersucht

sowie eine erste wirtschaftliche Bewertung bezogen auf Energieeinsatz, Ölaufwandmenge und Bekämpfungserfolg durchgeführt werden. Abschließend soll die Laborversuchseinrichtung mit Hilfe der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Versuchsreihen optimiert und die Umweltverträglichkeit von ausgebrachtem Pflanzenöl im Oberboden untersucht werden.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 Auswahl geeigneter Pflanzenöle**

Die Eignung von Pflanzenölen für die thermische Unkrautbekämpfung ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Ein wesentliches Kriterium ist dabei die Herstellungsweise. Grundsätzlich wird zwischen kaltgepressten und raffinierten Pflanzenölen unterschieden. Raffinierte Öle haben den Vorteil, dass durch den Raffinationsprozess unerwünschte Begleitstoffe wie beispielsweise Pigmente, Geruchs- und Geschmacksstoffe entfernt werden können, was sich unter anderem positiv auf die Erhöhung des Rauchpunktes auswirkt. Dieser liegt im Vergleich zu den meisten kaltgepressten Ölen häufig bei über 150 °C und ermöglicht somit ein Erwärmen der Pflanzenöle auf hohe Endtemperaturen ohne dass sich über der Flüssigkeit eine Rauchbildung entwickelt. Zwei weitere wichtige Kriterien bei der Auswahl geeigneter Pflanzenöle sind die Viskosität und die Dichte. Für eine erfolgreiche Spritzapplikation müssen die verwendeten Öle auch bei niedrigeren Temperaturen über gute Fließeigenschaften verfügen und dürfen bei Raumtemperatur nicht erstarren, da ansonsten die am Laborversuchsstand verbauten Düsen und Ventile verkleben könnten.

Zur Bestimmung der Viskosität von Pflanzenölen bei unterschiedlichen Temperaturen wurden für ausgewählte Öle Viskositäts-Temperatur-Profile mit Hilfe eines Kegel-Scheiben-Rheometers in Auftrag gegeben. Gleichzeitig wurde mit einem Dichtemessgerät für jedes Pflanzenöl ein Dichte-Temperatur-Profil angefertigt um die Änderung der Konsistenz bei steigender Flüssigkeitstemperatur aufzuzeigen.

Aus der Literatur wurden darüber hinaus die spezifischen Wärmekapazitäten potentieller Pflanzenöle ermittelt. Diese geben an, wie viel Wärme eine Flüssigkeit bei einer Temperaturzunahme pro Masseneinheit aufnehmen, beziehungsweise abgeben kann. Eine hohe Wärmekapazität bedeutet, dass das Fluid vergleichsweise viel Wärmeenergie speichern und nach der Applikation auf die Pflanzenoberfläche abgeben kann. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass ein schnelles Aufheizen einer Flüssigkeit zeit- und energieintensiv ist.

Abschließend wurden auch wirtschaftliche und ökologische Faktoren wie beispielsweise Kaufpreis, Verfügbarkeit und Herkunft mit in die Auswahl geeigneter Pflanzenöle einbezogen.



## **Aufwärmverhalten von Pflanzenölen im Vergleich zu Wasser**

Ergänzend zur Literaturrecherche wurde eine experimentelle Untersuchung zum Erwärmungsverhalten von Raps- und Sonnenblumenöl im Vergleich zum Trägerstoff 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 mit Hilfe eines Temperaturfühlers (Pt100, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH) dokumentiert. Während Wasser bis zum Siedepunkt (100 °C) erwärmt wurde, konnten beide Öle bis zum Erreichen ihres Rauchpunktes bei etwa 220 °C gefahrlos unter dem Abzug aufgeheizt werden. Um den Aufheizvorgang auch ökonomisch bewerten zu können, muss die zum Erwärmen der Flüssigkeiten aufgewendete Energie betrachtet werden. Hierüber lassen sich auch Rückschlüsse über die Energieeffizienz des gesamten Verfahrens ziehen. Die Bestimmung der aufgenommenen Wärmemenge  $\Delta Q$  [J] beim Erhitzen der Flüssigkeiten erfolgte über die Gleichung:

$$\Delta Q = m * c * \Delta T, \quad \text{(Gleichung 1)}$$

mit der Masse  $m$  [kg], der spezifischen Wärmekapazität  $c$  [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] sowie der Temperaturänderung  $\Delta T$  [K]. Bei der Berechnung der Wärmeaufnahme muss darauf hingewiesen werden, dass die Werte der spezifischen Wärmekapazität  $c$  von Wasser und Pflanzenöl temperaturabhängig sind. Diese verwendeten Wärmekapazitäten gelten nur für die Temperatur von 25 °C, können jedoch für die weiteren Untersuchungen vernachlässigt werden.

## **2.2 Entwicklung eines Laborversuchsstandes**

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

### **2.2.1 Vorversuche zur Bewertung des Abkühlverhaltens potentieller Trägerflüssigkeiten**

Zunächst wurden einfache Tastversuche mit Hilfe von Glaspipetten und Wasser als Trägerflüssigkeit durchgeführt um abschätzen zu können welche Wärmeverluste bei der Bildung einzelner Tropfen an der Pipettenspitze, im freien Fall und auf unterschiedlichen Oberflächen auftreten. Anschließend wurden verschiedene Pflanzenöle in einem Becherglas auf einem Magnetrührer erwärmt (Abb. 1) und auf die Oberfläche eines schwarzen Holunderblattes (*Sambucus nigra*) pipettiert und die Schadwirkung (bräunliche Verfärbung der Blattoberfläche) sowie das Abkühlverhalten im Vergleich zu Wasser dokumentiert (Abb. 2 und 3). Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde in mehreren Entwicklungsschritten ein Laborversuchsstand mit einem Heizelement unmittelbar an der Düsenspitze gebaut.

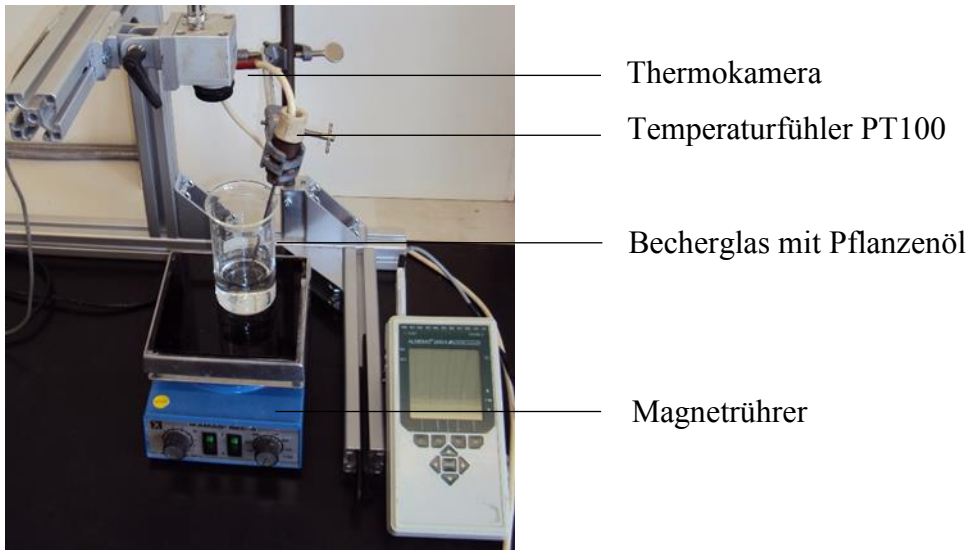


Abb. 1: Vorversuche mit Magnetrührer, Thermokamera, Temperaturfühler und Becherglas mit Pflanzenöl

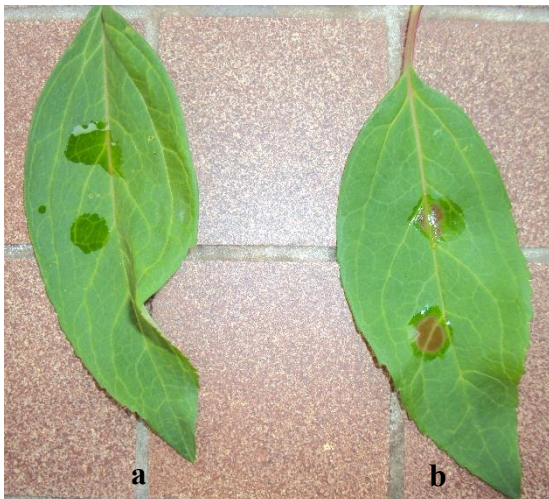


Abb. 2: a) Wassertropfen 50 °C  
b) Wassertropfen 95 °C

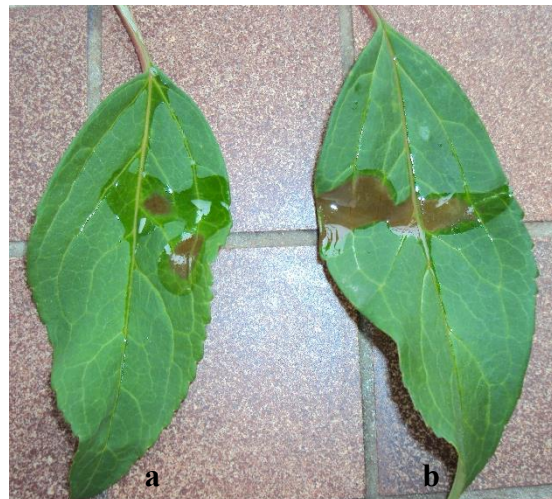


Abb. 3: a) Rapsöltropfen 95 °C  
b) Rapsöltropfen 180 °C

### 2.2.2 Aufbau einer Laborapplikationseinrichtung

Der in Abbildung 4 dargestellte Versuchsstand setzt sich im Wesentlichen aus einer elektrisch gesteuerten Holpatrone (Abb. 5 Türk & Hillinger GmbH) bestehend aus einem Messingrohr ( $L = 100 \text{ mm}$ ,  $\varnothing = 14 \text{ mm}$ ) mit integrierter, massearmer Hochleistungsrohrpatrone zusammen. Diese Heiztechnik findet üblicherweise in der Klebstoffindustrie für das Erwärmen von Düsen und Heißkanalwerkzeugen Verwendung und wurde für die angestrebten Versuchszwecke modifiziert. Über eine separate Steuereinheit können Flüssigkeiten auf Temperaturen bis zu

400 °C erwärmt und die tatsächliche Temperatur über ein am unteren Ende der Hohlpatrone fest eingebautes Thermoelement angezeigt werden. Das Messingrohr wurde mit einem Innengewinde versehen, damit unterschiedliche Applikationsdüsen eingeschraubt und auf ihre Eignung getestet werden können. Über den Querschnitt des Düsenlochs lassen sich sowohl die Durchflussmenge pro Zeiteinheit als auch die Tropfenform beeinflussen. Die Dosierung des Pflanzenöls wurde zunächst über ein manuell zu bedienendes Rändelrad am oberen Ende der Hohlpatrone (Abb. 5 a) realisiert. Dieses erwies sich jedoch schnell als wenig praktikabel, da die Mengenzuteilung zu unpräzise erfolgte. Im weiteren Projektverlauf wurde die manuelle Flüssigkeitszuteilung via Rändelrad durch eine elektrisch angetriebene Peristaltikpumpe (Perimax 12) der Firma Spetec GmbH, welche das Pflanzenöl über einen Silikonschlauch aus einem wahlweise beheizbaren Vorratsbehälter mit einem Druck  $< 1,5$  bar in die Hohlpatrone fördert (Abb. 5 b), ersetzt. Zu diesem Zweck musste in die Steuerung der Peristaltikpumpe eingegriffen werden um auf Knopfdruck ein zuvor definiertes Volumen dosieren zu können, welches sich aus dem Schlauchinnendurchmesser, der Anzahl der Schlauchpumpenrollen sowie deren Umlaufgeschwindigkeit ergibt. Der weite und stufenlos einstellbare Geschwindigkeitsbereich der Pumpe ( $1 - 80 \text{ U min}^{-1}$ ) und die Verwendung verschiedener Schlauchdurchmesser ( $0,1 - 3,1 \text{ mm}$ ) ermöglicht Fördermengen von  $0,004 - 40 \text{ ml min}^{-1}$  sowie das Dosieren einzelner Tropfen mit einem Volumen von ca.  $0,01 \text{ ml}$  (bei  $250 \text{ °C}$ ).

Um die Trägerflüssigkeit exakt und reproduzierbar auf bestimmte Bereiche der Pflanzenoberfläche applizieren zu können, sind zum besseren Anvisieren zwei Linienlaser in einem Winkel von  $90^\circ$  und einem Abstand von  $120 \text{ mm}$  zueinander verbaut worden. Mit Hilfe einer gelochten Vakuumpalte (Abb. 4) können selbst kleine Pflanzenblätter, durch Unterdruck, schonend fixiert und das Anlagerungsverhalten pflanzlicher Öle bei unterschiedlichen Blattstellungen simuliert werden. Über ein mechanisches Drosselventil kann der Unterdruck soweit herabgesenkt werden, dass es zu keinerlei Beschädigungen an der Blattoberfläche kommt.

Zusätzlich ist auf dem Laborversuchsstand an einer Gelenkhalterung eine Thermokamera (PI 160) der Firma Optris GmbH montiert mit der die Temperatur und das Abkühlverhalten von Öltropfen im freien Fall und auf der Pflanzenoberfläche berührungslos und hoch genau gemessen werden kann. Hierdurch können Erkenntnisse zum Abkühlverhalten von Pflanzenölen in Abhängigkeit der Ausgangstemperatur, der Ölaufwandmenge, der Fallhöhe sowie der Pflanzenoberfläche gewonnen werden. Eine Hochgeschwindigkeitskamera (HotShot 1280, NAC Image Technology) ermöglicht genauere Untersuchungen zum Abtropf- und Flugverhalten von Öltropfen sowie deren Aufprall- und Anlagerungsverhalten unmittelbar auf der Blattoberfläche. Alle Komponenten werden über ein  $40 \times 40 \text{ mm}$  Alu-Profileschienensystem miteinander verbunden und lassen sich dadurch einfach und variabel in Ihrer Position

verändern. Um weitere technische und physikalische Einflussparameter zu erkennen und den Umgang mit dem Laborversuchsstand zu üben wurden zunächst umfangreiche Testdurchläufe und Probemessungen auf Referenzoberflächen sowie daraus resultierende Optimierungsmaßnahmen durchgeführt.

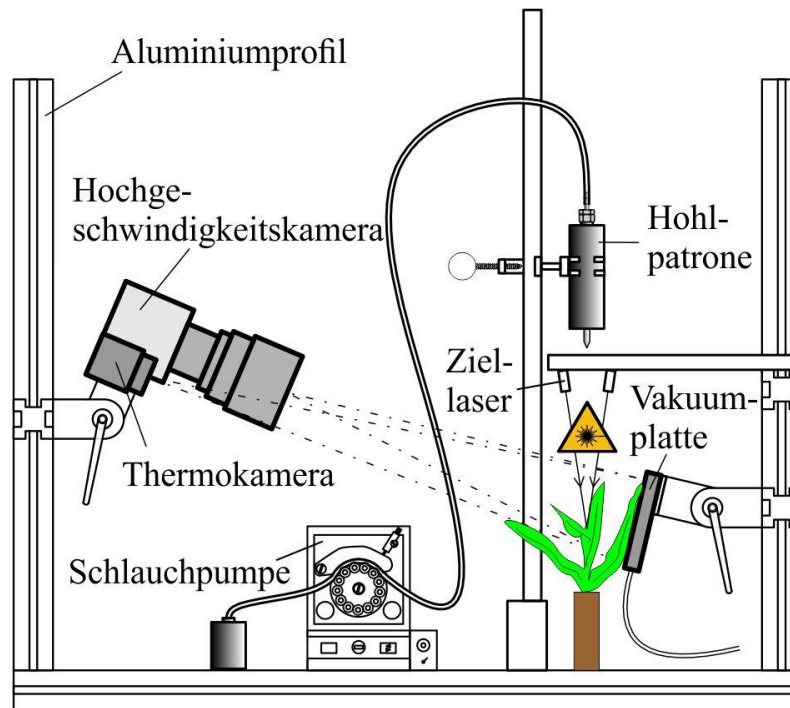


Abb. 4: Laborapplikationsstand mit Hohlpatrone

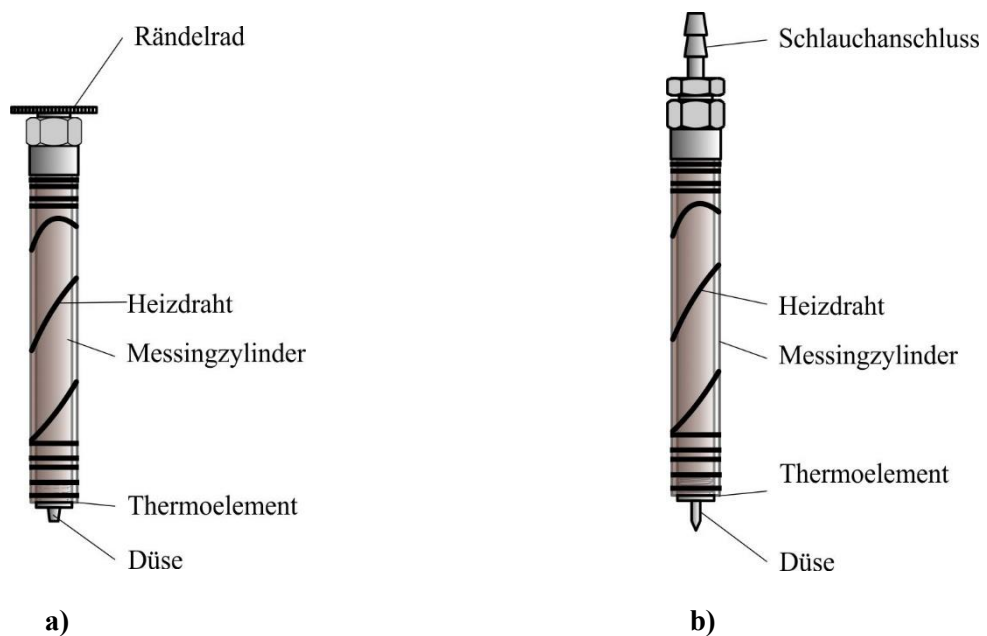


Abb. 5: Aufbau einer Hohlpatrone a) mit Rändelrad und b) mit Schlauchanschluss

### **2.2.3 Softwareentwicklung**

Für Untersuchungen zum Flugverhalten von heißen Öltröpfen im freien Fall sowie des Anlagerungsverhaltens auf Pflanzenoberflächen wurden Nahaufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt. Dabei wird die Aufnahmedauer bedeutend von der Kameraauflösung und der Bildfrequenz beeinflusst. Die meisten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden bei einer Auflösung von 640 x 512 und einer Bildfrequenz von 500 Bildern pro Sekunde aufgenommen um das Flugverhalten der einzelnen Tropfen lückenlos und exakt dokumentieren zu können. Bei dieser Kameraeinstellung war, technisch bedingt (geringer Arbeitsspeicher), eine maximale Aufnahmedauer von nur 1,6 s möglich, was insgesamt einer Einzelbildanzahl von 800 Bildern entspricht. Im Anschluss an jede Hochgeschwindigkeitsaufnahme mussten diese Einzelbilder (BMP-Format) umgewandelt und zu einem Video (AVI-Format) zusammengefügt werden, was mit herkömmlichen Standardprogrammen auf Grund der hohen Anzahl an Einzelbildern nicht möglich war. Daher wurde am Institut für Landtechnik eine passende Software entwickelt mit deren Hilfe Videos, bestehend aus mehr als 400 Einzelbildern, zusammengefügt und verlangsamt mit einem Videoprogramm abgespielt werden können.

Bei der Aufnahme von Infrarotbildern zur Bestimmung des Abkühlverhaltens von Öltröpfen auf der Pflanzenoberfläche können innerhalb weniger Minuten Datensätze  $> 20.000$  Einzeldaten entstehen. Daher bedurfte es bei der Umwandlung der Infrarotbilder (RAVI-Format) in ein gängiges Videoformat (AVI-Format) sowie in ein Format für Datenverarbeitungsprogramme (CSV-Format) ebenfalls einer individuellen und speziell angepassten Softwarelösung. Auch hierfür konnte das Institut für Landtechnik ein passendes Programm entwickeln und für die Datenauswertung bereitstellen.

### **2.3 Untersuchung des Anlagerungsverhaltens auf der Pflanzenoberfläche**

Für eine effiziente Übertragung von Wärmeenergie auf Unkrautpflanzen ist es wichtig, dass die Trägerflüssigkeit möglichst flächig auf die Pflanzenoberfläche einwirken kann. In den angestrebten Unkrautbekämpfungsversuchen mit heißen Ölen erfolgt die Applikation zunächst in Tropfenform. Um dabei eine gute Verteilung auf dem Blatt gewährleisten zu können, muss sowohl die Flüssigkeit selbst, als auch die Blattoberfläche der Pflanze bestimmte Eigenschaften aufweisen. Zum einen spielt die Oberflächenspannung des Trägerstoffes, sowie dessen Viskosität eine Rolle. Andererseits tragen ebenso die Struktur und der Aufbau der Blattoberfläche zur Verteilung der Flüssigkeit bei.

Die Oberflächenspannung ist ein Index für die niedermolekularen Anziehungskräfte der Teilchen eines Stoffes (Goankar, 1989). Kommt dieser in Kontakt mit anderen Stoffen wie

beispielsweise der Blattoberfläche oder dem Stängel eines monokotylen Unkrauts, so ordnen sich die Molekularpartikel im Tropfen gemäß ihrer Oberflächenspannung an der Pflanzenoberfläche an und führen zu einem bestimmten Benetzungsgrad der Pflanze mit dem applizierten Öl. Dieser wird mit Hilfe des Kontaktwinkels zwischen eines Öltropfens und der Blattoberfläche an der Grenzfläche Öl, Wasser, Luft, gemessen (Marmur, 2006; Immink, 2009). Das Prinzip ist in der Abbildung 6 veranschaulicht. Ein Kontaktwinkel des Tropfens mit der Blattoberfläche von  $180^\circ$  ist als vollkommene Unbenetzbarkeit einzustufen (Abb. 6a). Der Tropfen nimmt eine maximal kugelige Form an und besitzt damit nur einen sehr geringen Berührungspunkt mit der Blattoberfläche. Dagegen bedeutet ein Kontaktwinkel von  $0^\circ$  (Abb. 6c) eine vollständige Benetzbarkeit.

Rapsöl besitzt bei  $20^\circ\text{C}$  mit  $31,5\text{ mNm}^{-1}$  eine relativ geringe Oberflächenspannung im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten wie beispielsweise Wasser mit  $72,75\text{ mNm}^{-1}$  (Vargaftik, 1983; Goankar, 1989). Eine geringe Oberflächenspannung führt zu einem höheren Grad der Benetzbarkeit was sich meist durch einen dünnen, flächendeckenden, monomolekularen Film auf der Blattoberfläche ausprägt (Kirkwood, 1993) (Abb. 6c).

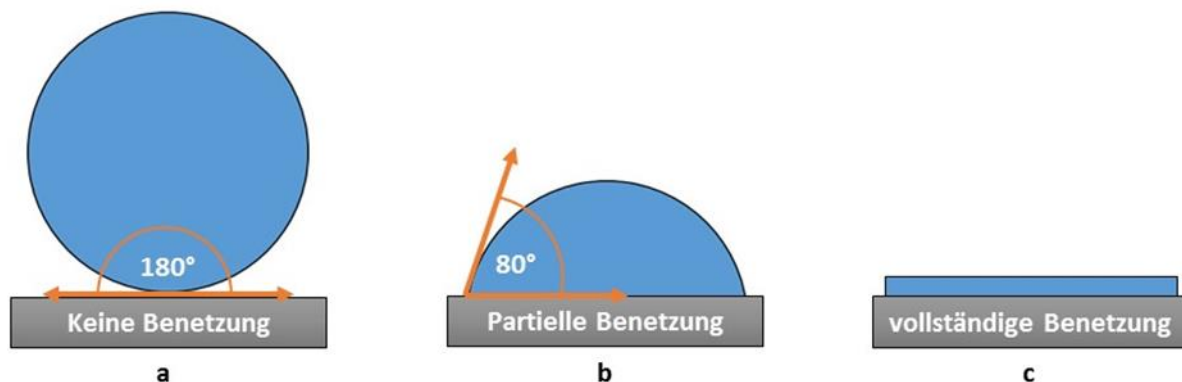


Abb. 6: Flüssigkeitstropfen mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen auf einer festen Oberfläche mit Kontaktwinkeln von  $180^\circ$ ,  $80^\circ$  und  $0^\circ$

Um den Einfluss der Pflanzenoberfläche und der Blattstellung auf das Anlagerungsverhalten von heißem Pflanzenöl im Laborversuch zu bestimmen, wurden verschiedene Untersuchungen mit Hilfe eines digitalen Mikroskops und einer Vakuumplatte an unterschiedlichen Unkräutern durchgeführt. Für eine bessere Sichtbarkeit und eine visuelle Bewertung des Anlagerungsbeziehungsweise Abrollverhaltens wurde das Pflanzenöl mit öllöslicher Lebensmittelfarbe dunkel eingefärbt und tropfenweise auf die Blattoberfläche aufgebracht. Die Position der einzelnen Unkrautblätter wurde über ein Gelenk in  $10^\circ$ -Schritten von einer horizontalen ( $0^\circ$ ) zu einer vertikalen Lage ( $90^\circ$ ) verändert (Abb. 7). Es wurde versucht ein Bewertungsschema anhand der Länge und Breite der Verlaufsspur auf der Blattoberfläche zu entwickeln.

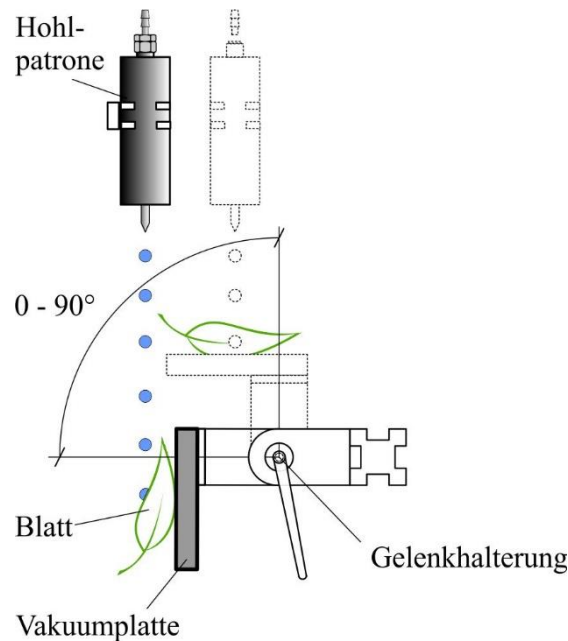


Abb. 7: Vakuumpatte mit Winkelverstellung (0 bis 90°) zur Ermittlung des Anlagerungsverhaltens

## 2.4 Auswahl und Anzucht von Ackerunkräutern im Versuchsgewächshaus

### 2.4.1 Auswahl potentieller Ackerunkräuter

Die Auswahl geeigneter Ackerunkräuter für eine Heißölapplikation erfolgte in enger Zusammenarbeit mit mehreren Saatgutzüchtern. Ackerunkräuter werden in Deutschland nur vereinzelt zum Kauf angeboten, da für diese speziellen Kulturen kein hinreichender Absatzmarkt vorherrscht. Auf Grund des eingeschränkten Saatgutangebotes und den teils schwierigen Anzuchtbedürfnissen wurden folgende monokotyle sowie dikotyle Ackerunkräuter für die Heißölapplikationsversuche ausgewählt (Tab.1).

Tab. 1: Liste der ausgewählten Versuchsunkräuter

Monokotyle Unkräuter	Dikotyle Unkräuter
Gemeine Quecke ( <i>Agropyron repens</i> )	Blaue Kornblume ( <i>Centaurea cyanus</i> )
Deutsches Weidelgras ( <i>Lolium perenne</i> )	Hirtentäschel ( <i>Capsella bursa-pastoris</i> )
	Löwenzahn ( <i>Taraxacum officinale</i> )
	Echte Kamille ( <i>Matricaria recutita</i> )



Abb. 8: Gemeine Quecke



Abb. 9: Deutsches Weidelgras

Die beiden monokotylen Unkräuter *Gemeine Quecke* (Abb. 8) und *Deutsches Weidelgras* (Abb. 9) kommen in allen Ackerbaukulturen vor, sind ausdauernd und erreichen durch ihre aufrechten, glatten Halme eine Wuchshöhe von 120 bis 150 cm (Klaaßen & Freitag, 2004).



Abb. 10: Blaue Kornblume



Abb. 11: Hirtentäschel



Abb. 12: Löwenzahn



Abb. 13: Echte Kamille

Die *Blaue Kornblume* (Abb. 10) ist ein überjähriges Samenunkraut welches vor allem im Getreide, vereinzelt aber auch in Rüben vorkommt. Dabei erreicht es mit seinen lanzettlich, wollig behaarten Laubblättern eine Wuchshöhe von bis zu 100 cm. Die Blätter des zweijährig



keimenden *Hirtentäschels* (Abb. 11) sind dagegen unbehaart. Eine mehrjährige, ausdauernde Unkrautpflanze ist der *Löwenzahn* (Abb. 12). Dieser bildet bei einer maximalen Wuchshöhe von ca. 45 cm neben einer Rosette mit einem grundständigen Blattansatz eine ausgeprägte Pfahlwurzel aus. Im Gegensatz zu den vorherigen, dikotylen Unkrautpflanzen ist das äußere Erscheinungsbild der überjährigen *Echten Kamille* (Abb. 13) zunächst von keulenartigen, ungestielten und unbehaarten Keimblättern geprägt. Die Laubblätter entwickeln sich im weiteren Wachstumsverlauf erst lanzettlich, später doppelt bis dreifach fiederteilig (Klaaßen & Freitag, 2004).

Die nachfolgenden Kulturen konnten auf Grund eines zu geringen Keimungs- und ungleichmäßigen Auflaufverhaltens nicht für die Heißölapplikationsversuche genutzt werden: Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*), Rote Taubnessel (*Lamium purpureum*), Klatschmohn (*Papaver rhoeas*), Stängellose Kratzdistel (*Cirsium acaule*), Ackerstiefmütterchen (*Viola arvensis*) und Vogelmiere (*Stellaria media*).

Bei den gewählten Unkräutern (Tab. 1) handelt es sich um typische, teils perennierende Ackerunkräuter, die einen großen, negativen Einfluss auf das Wachstum und die Entwicklung von ackerbaulichen Kulturpflanzen haben können und somit für dieses Forschungsprojekt von besonderer wissenschaftlicher Bedeutung sind. Durch die Auswahl dieser Problemunkräuter erlangen die Versuchsergebnisse in Hinblick auf den Bekämpfungserfolg eine gewisse, praxisrelevante Aussagekraft.

#### **2.4.2 Anzucht potentieller Ackerunkräuter im Versuchsgewächshaus**

Für einen erfolgreichen und gleichmäßigen Pflanzenaufwuchs wurden alle Unkräuter im Versuchsgewächshaus der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn unter kontrollierten, klimatischen Bedingungen, breitflächig in gelochte Anzuchtschalen (50 x 32 x 6 mm) ausgesät (Abb. 14). Die Samen wurden entsprechend den Vorgaben der Saatgutzüchter auf beziehungsweise in ein spezielles, gesiebtes Vermehrungssubstrat mit Perlite als Bodenhilfsstoff abgelegt und angedrückt. Eine Bewässerung erfolgte bei regelmäßigen Kontrollgängen nach Bedarf. Die durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur betrug im Gewächshaus 18,6 °C bei einer täglichen, 12 stündigen Zusatzbeleuchtung von 7000 Lux. Unter diesen Bedingungen dauerte das Auflaufen der Samen ca. 2 Wochen. Anschließend wurden die einzelnen Unkrautpflanzen in Schalen mit 1,5er Topferde manuell pikiert (Abb. 15) und bis zum gewünschten Wachstumsstadium weiter angezogen (Abb. 16). Dabei bestand jede Schale aus 2 Versuchsvarianten mit jeweils 28 in Reihe angeordneten Unkrautpflanzen. Durch die exakte Positionierung in der Anzuchtschale konnten Einzelpflanzenbehandlungen ohne weitere Markierungen durchgeführt werden. Jede Versuchsvariante verfügt demnach, für eine eindeutige, statistische Aussagekraft, über 28 Wiederholungen. Für jedes Wachstumsstadium

wurde zudem eine Kontrolle mit ebenfalls 28 Pflanzen angelegt. Entsprechend der Gewächshaus- und Laborkapazität wurden die Ackerunkräuter in Abständen von 1 Woche neu ausgesät um immer ausreichend viele Pflanzen zur Verfügung zu haben (Abb. 17).



Sieb

Andrückbrett

Anzuchtschale mit Etikett

Abb. 14: Anzuchtschale mit Sieb, Andrückbrett und Etiketten



Abb. 15: Hirtentäschel nach dem Pikieren



Abb. 16: Hirtentäschel 14 Tage nach dem Pikieren



Abb. 17: Wöchentliche Anzucht von Versuchsunkräutern im Gewächshaus

## 2.5 Durchführung der Applikationsversuche mit anschließender Bonitur

Durch eine Reihe von Vorversuchen, sowohl im Gewächshaus als auch im Labor, konnte die Auswahl an Versuchsparametern reduziert werden (Tab. 2). Neben den 6 ausgewählten Unkräutern (Tab. 1) wurden 2 Pflanzenöltemperaturen für die Versuche festgelegt. Dabei soll 250 °C als obere und 200 °C als untere Temperaturgrenze dienen. Sofern bei der 200 °C Variante eine sehr gute, pflanzenschädigende Wirkung erzielt wird, kann in nachfolgenden Versuchen die Temperaturgrenze weiter herabgesetzt werden um den Bereich der minimal wirksamen Pflanzenöltemperatur näher einzugrenzen. Alle Unkrautbekämpfungsmaßnahmen wurden jeweils im Keim-, 2-, 4- und 6-Blattstadium durchgeführt. Eine Behandlung im späteren Wachstumsverlauf (> 6-Blattstadium) wurde als nicht praxisrelevant erachtet, da Unkräuter möglichst früh bekämpft werden müssen um der Kulturpflanze zu einem optimalen Wachstum zu verhelfen. Die Ölaufwandmenge wurde in drei Stufen, beginnend bei einer Masse von 0,1 ml über 0,05 ml auf 0,03 ml verringert um die minimale Aufwandmenge herauszufinden bei der eine signifikante Pflanzenschädigung zu verzeichnen ist. Des Weiteren konnte in Vorversuchen herausgefunden werden, dass der effektivste Bekämpfungsort in Hinblick auf Ölaufwandmenge und Öltemperatur das Wachstumszentrum (bei dikotylen Unkräutern) beziehungsweise der Bereich zwischen Wurzelhals und Hypokotyl (bei monokotylen Unkräutern) ist. Für eine wirksame Pflanzenschädigung bei einer Blatt- oder Blattstielapplikation muss die Aufwandmenge um ein Vielfaches erhöht werden. Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung und Anzahl der jeweiligen Versuchsvarianten. Insgesamt wurden 4032 Unkräuter für die Hauptuntersuchung angezogen und mit heißem Öl betropft.

Tab. 2: Berechnung des Versuchsumfanges mit 2 monokotylen und 4 dikotylen Unkräutern

Unkräuter	1	1	1	1	1	1
Temperaturen	2	2	2	2	2	2
Wachstumsstadien	4	4	4	4	4	4
Pflanzenölsorte	1	1	1	1	1	1
Öl-Aufwandmengen	3	3	3	3	3	3
Bekämpfungsorte	1	1	1	1	1	1
Wiederholungen	28	28	28	28	28	28
<b>Σ Unkrautpflanzen</b>	<b>672</b>	<b>672</b>	<b>672</b>	<b>672</b>	<b>672</b>	<b>672</b>
<b>Σ Gesamt</b>	<b>4032</b>					

Das Aufbringen von heißem Pflanzenöl auf Unkrautpflanzen erfolgte über den Applikationsversuchsstand im Institutslabor. Hierfür wurde das Pflanzenöl aus einem Vorratsbehälter über einen Schlauch direkt in die Hohlpatrone gefördert und auf die voreingestellte Temperatur erhitzt. Anschließend wurde das Öl tropfenweise aus 150 mm Höhe (über dem Bestand) mit Hilfe des Ziellasers auf die Oberfläche jeder einzelnen Unkrautpflanze appliziert und die eingestellten Parameter dokumentiert.

Die Bonitur jeder einzelnen Unkrautpflanze erfolgte unmittelbar vor und nach der Applikation im Labor, sowie wöchentlich (21 Tage) im nicht klimatisierten Vegetationsgewächshaus. Der Bekämpfungserfolg wurde visuell anhand des Pflanzenhabitus (Stärke der Welkeerscheinung, nekrotische Blattschädigung, Braunfärbung und Wuchsreduktion) im Vergleich zur Kontrollvariante ermittelt und für anschließende Analysen fotografisch festgehalten. Der Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfungsmaßnahme wurde abgewandelt nach ABBOTT prozentual ermittelt und mit einem statistischen Datenverarbeitungsprogramm ausgewertet und visualisiert (Abbott, 1925).

$$\text{Wirkungsgrad nach Abbott in \%} = \left( \frac{X_n - Y_n}{X_n} \right) * 100 \quad (\text{Gl. 2})$$

*X<sub>n</sub> = Anzahl unbeschädigter Pflanzen in Kontrolle*

*Y<sub>n</sub> = Anzahl unbeschädigter Pflanzen in Versuch*

## 2.6 Wirtschaftliche Bewertung der Heißölapplikation

Für eine ökonomische Bewertung des Heißölverfahrens ist es notwendig umfangreiche Kenntnisse über unterschiedliche Einflussfaktoren zu haben. Die Verfahrenskosten werden grundsätzlich von der Unkrautdichte, dem Unkrautalter, sowie der Ölaufwandmenge und der Öltemperatur beeinflusst. Die Art der Konstruktion eines feldtauglichen Versuchsträgers trägt

in Abhängigkeit der Heiztechnik, des Unkrautererkennungssystems, der Energieversorgung, der Dimensionierung des Behältervolumens und der Arbeitsbreite zu einer weiteren, wesentlichen Kostensteigerung bei. Eine weitere Herausforderung der wirtschaftlichen Bewertung der Verfahrenskosten ist der Prototypenstatus. Eine Vielzahl wichtiger Bauteile muss speziell für die hohen Anforderungen dieses Applikationssystems konstruiert oder aus dem Sonderbau beschafft werden. Sofern all diese Einflussfaktoren bekannt sind, können die Verfahrenskosten für unterschiedliche Einsatzszenarien berechnet werden.

## 2.7 Ökologische Bewertung des Abbauverhaltens im Oberboden

Zur Bestimmung des Abbauverhaltens von Pflanzenöl im Oberboden wurden Respirationsversuche in Kooperation mit dem Institut für Bodenkunde der Universität Bonn durchgeführt.

Um ein möglichst aussagekräftiges und standortunabhängiges Ergebnis zu erhalten wurden 3 verschiedene Ackerböden aus unterschiedlichen Regionen in Nordrhein-Westfalen für die Laboranalysen ausgewählt (Tab. 3). Hierbei war besonders wichtig, dass auf dem Acker seit langer Zeit keine C<sub>4</sub>-Pflanzen - in der Regel Mais - mehr angebaut worden sind. Die Standorte der Probenentnahme (jeweils 6 kg aus einer Tiefe von 0 – 30 cm) waren das Versuchsgut der Universität Bonn „Campus Klein-Altendorf“ in Rheinbach (Boden 3), sowie Wassenberg (Boden 2) und Orsbach bei Aachen (Boden 1).

Tab. 3: Vergleich der drei ausgewählten Böden anhand ihrer Eigenschaften

	<b>Boden 1</b>	<b>Boden 2</b>	<b>Boden 3</b>
Sandgehalt in %	15,0	72,3	11,9
Schluffgehalt in %	63,4	20,3	62,7
Tongehalt in %	20,7	6,0	22,6
N Gehalt in mg kg <sup>-1</sup> Boden <sup>-1</sup>	2.050	1.450	1.530
P Gehalt in mg kg <sup>-1</sup> Boden <sup>-1</sup>	139,9	265,9	64,3
K Gehalt in mg kg <sup>-1</sup> Boden <sup>-1</sup>	314	313	318
C in g kg <sup>-1</sup> Boden <sup>-1</sup>	21,6	16,8	13,8
C/N Verhältnis	10,5	11,6	9,0
pH-Wert	6,2	5,8	6,6

Alle Böden für die weiteren Untersuchungen standardisiert aufbereitet. Dazu zählten unter anderem das Aussieben auf eine Korngröße von 2 mm und das Einstellen eines identischen Wassergehaltes von 45 % der maximalen Wasserhaltekapazität um eine hohe Mikrobielle Aktivität gewährleisten zu können. Darüber hinaus wurden der pH-Wert, eine Körnungsanalyse und die C und N Gehalte bestimmt. Die so aufbereiteten Böden wurden anschließend zu je 35 g (Trockengewicht) in Plastikvessels eingewogen und im Labor in 10 Varianten mit Öl versetzt. Mit Hilfe eines Vortex-Schüttlers (VWR International GmbH) konnte das Öl gleichmäßig in den Boden eingemischt werden (Abb. 18). Neben unterschiedlichen Ölaufwandmengen (0,1, 1 und 3 ml), welche sich an praxisnahen Werten für die Unkrautbekämpfung mit heißen Ölen orientieren und Öltemperaturen von 22 und 100 °C wurden auch einige Bodenproben mit 210 mg Nährstoffen versetzt. Zusätzlich wurden Kontrollvarianten ohne Ölzugabe und Nährstoffen angelegt um die Grundumsatzrate im Boden beziehungsweise den Einfluss durch Öl auf die Mikrobielle Aktivität besser bestimmen zu können.

Ein Teil der gesiebten Proben wurde bei 40 °C getrocknet und anschließend gemahlen um das Isotopenverhältnis mittels Isotopen-Massenspektrometrie bestimmen zu können. Wichtig für die Laboruntersuchungen war es ein C<sub>4</sub>-Pflanzenöl zu verwenden welches ein möglichst unterschiedliches Isotopenverhältnis im Vergleich zum Boden aufweist. Dadurch kann im Nachhinein quantifiziert werden, ob das freigesetzte CO<sub>2</sub> aus der organischen Bodensubstanz oder dem zugegebenen C<sub>4</sub>-Öl stammt. Für die Versuche wurde ein C<sub>4</sub>-Maiskeimöl mit einem  $\delta^{13}\text{-C}$  Wert von -16,65 ‰ ausgewählt. Zur Bestimmung der mikrobiellen Isotopenfraktionierung musste hingegen ein C<sub>3</sub>-Öl gefunden werden welches dem  $\delta^{13}\text{-C}$  Wert der organischen Bodensubstanz entspricht. Da hierfür kein passendes Pflanzenöl gefunden werden konnte musste dieses durch Mischen mit einem C<sub>4</sub>-Maiskeimöl auf einen  $\delta^{13}\text{-C}$  Wert von -27,19 ‰ selber hergestellt werden.

Anschließend wurden bis zu 95 Plastikvessels für eine Dauer von 6 Wochen bei 22 °C in ein Respirometer (Respicond VIII, Nordgren Innovations AB) gestellt welches die CO<sub>2</sub> Freisetzung aus dem Boden über die Leitfähigkeitsänderung einer Kaliumhydroxidlösung stündlich misst (Abb. 19). Der aus dem Boden freigesetzte Kohlenstoff wird dabei in der Kaliumhydroxidlösung gebunden. Nach Abschluss der Experimente wird dieser mit Hilfe von Bariumchlorid ausgefällt und liegt dann als Bariumcarbonat vor. Anhand der freigesetzten Menge an CO<sub>2</sub> und des  $\delta^{13}\text{-C}$  Wertes können Rückschlüsse auf die Höhe des Pflanzenölabbau im Ackerboden über die Versuchsdauer von 6 Wochen gezogen werden.



Abbildung 18: Vortex-Schüttler



Abbildung 19: Respirometer mit Plastikvessel

## 2.8 Optimierung der Applikationseinrichtung

Aus den Erkenntnissen der abgeschlossenen Unkrautbekämpfungsversuche mit dem bisherigen Laborapplikationsstand wurde in einem weiteren Arbeitsschritt ein völlig neues Applikationssystem konstruiert. Ziel dieser Optimierungsbestrebung war, ein effizienteres Aufheizen sowie eine für den praktischen Dauereinsatz geeignetere und leistungsstärkere Applikationstechnik mittels gepulstem Vollstrahl zu entwickeln. Für diesen Zweck sollten alle Baugruppen robuster ausgelegt und für eine einfache Reinigung leicht zu erreichen sein.

Eine wesentliche Anforderung an das optimierte System war das Erhitzen von Pflanzenöl auf Temperaturen bis zu 250 °C und eine konstante und druckstabile Fördermenge  $> 40 \text{ ml min}^{-1}$  sicherzustellen. Der Transport des erhitzten Pflanzenöls vom Vorratstank zur Düse muss störungsfrei und ohne größere Temperaturverluste erfolgen. Dafür ist eine ständige Temperaturüberwachung innerhalb des gesamten Laborversuchsstands von besonderer Bedeutung.

Die Applikationsdüse sollte derart beschaffen sein, dass auch größere Flüssigkeitsmengen in kurzer Zeit präzise und mengengesteuert auf Unkrautpflanzen aufgebracht werden können ohne dass es dabei zu einer Nachtropfenbildung an der Düsen Spitze kommt. Ein gepulster Vollstrahl in Kombination mit einem beweglichen Düsenhalter kann so auch das Versprühen heißer Öle in Winkeln zwischen 0 und 90° sowohl längs als auch quer zur Fahrtrichtung, selbst über größere Distanzen, ermöglichen. Zudem erlaubt die großzügige Dimensionierung aller Baugruppen den Einsatz auch mehrerer Düsen gleichzeitig, was die Arbeitsgeschwindigkeit

und die Schlagkraft des eingesetzten Systems erhöht.

Eine kompakte Bauform und eine zuverlässige Technik sollen ermöglichen das System zukünftig auch im feldnahen Einsatz zu testen. Die Betriebssicherheit und der Schutz vor Gefahren wie beispielsweise Verbrennungen müssen beim Bau oberste Priorität haben. Um die Optimierungsmaßnahmen der Applikationseinrichtung bewerten zu können, müssen Unkrautbekämpfungsversuche mit denselben Parametern wie bei der tropfenweisen Heißölapplikation durchgeführt und für einen Systemvergleich ausgewertet werden.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Besondere Eignung von Raps- und Sonnenblumenöl

Die Untersuchung von ca. 100 Pflanzenölen auf ihre Eignung für eine thermische Unkrautbekämpfung hat ergeben, dass sowohl Raps- als auch Sonnenblumenöl besonders geeignet sind. Vor allem ihre thermophysikalischen und fluidmechanischen Eigenschaften (Rauch- und Flammpunkt, Viskosität, Dichte, spezifische Wärmekapazität) als auch ökonomische und ökologische Faktoren (Kaufpreis, Verfügbarkeit, Herkunft) machen diese Öle besonders attraktiv für eine Heißölapplikation. In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 4) sind Raps- und Sonnenblumenöl mit den jeweiligen Untersuchungsparameter aufgelistet.

Tab. 4: Untersuchte Eigenschaften von Raps- und Sonnenblumenöl

	Rapsöl raffiniert	Sonnenblumenöl raffiniert
Rauchpunkt [°C]	220	225
Flammpunkt [°C]	317	316
Viskosität (20 / 250 °C) [mPas s]	67 / 1	59 / 1
Dichte (20 / 250 °C) [kg m <sup>-3</sup> ]	919 / 765	917 / 756
Spez. Wärmekapazität [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1970	1970
Anbaugesbiet	Europa	Europa
Preis [€ l <sup>-1</sup> ]	< 1,20	< 1,50

Aufgrund des speziellen Herstellungsverfahrens (durch Raffination) können beide Öle > 220 °C ohne Rauchbildung erwärmt werden. Der Flammpunkt liegt bei > 315 °C. Beim Erwärmen der Flüssigkeit von 20 °C (Raumtemperatur) auf 250 °C (maximale Applikationstemperatur im Laborversuch) sinkt die dynamische Viskosität signifikant von 67 mPas s bei Rapsöl und 59 mPas s bei Sonnenblumenöl auf jeweils 1 mPas s ab (Abb. 20). Diese physikalische Eigenschaft hat besonderen Einfluss auf das Fließverhalten der Öle, da erst ab einer Viskosität < 50 mPa s das Fördern mit einer Peristaltikpumpe mit geringen



Schlauchdurchmessern problemlos möglich ist, sowie auf die Tropfenbildung. Auch bei niedrigen Außentemperaturen kommt es weder bei Raps- noch bei Sonnenblumenöl zum Erstarren was sich positiv auf die Funktion einzelner Baugruppen wie beispielsweise Förder-, Dosier- und Regelorgane auswirkt.

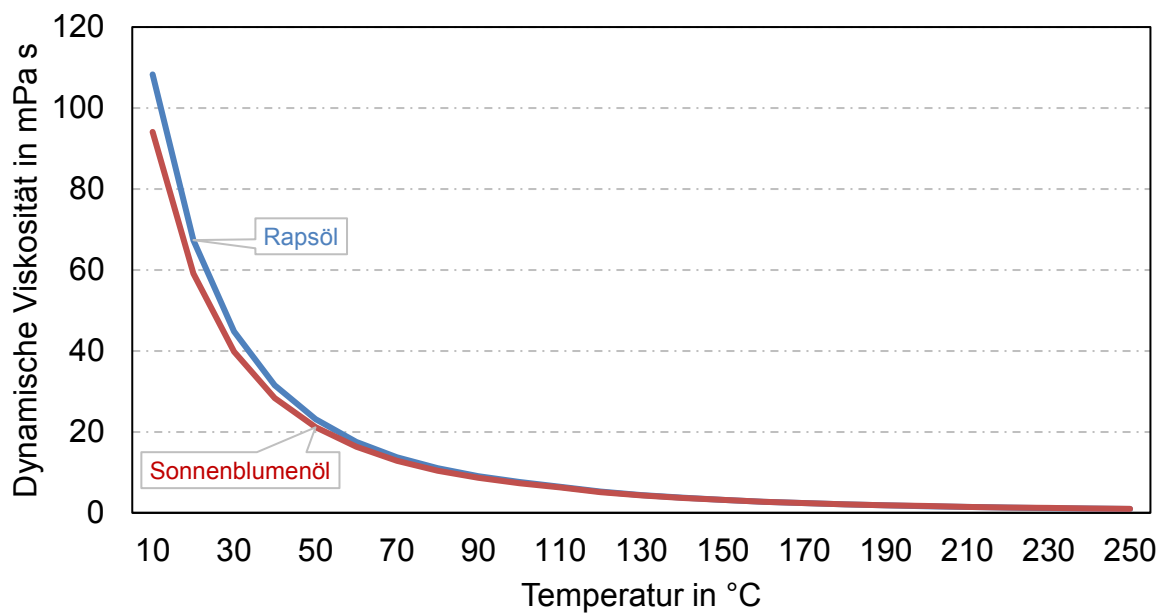


Abb. 20: Viskositäts-Temperatur-Diagramm von Raps- und Sonnenblumenöl

Eine Temperaturerhöhung um 230 K hat neben der Veränderung der dynamischen Viskosität auch eine signifikante, lineare Abnahme der Dichte der beiden Öle um ca. 17 % zur Folge (Abb. 21). Die daraus resultierende Volumenzunahme beträgt ca. 20 % was bei einem geschlossenen Heizbehältersystem unbedingt zu beachten ist um ein Überlaufen bzw. eine zusätzliche Druckerhöhung zu vermeiden.

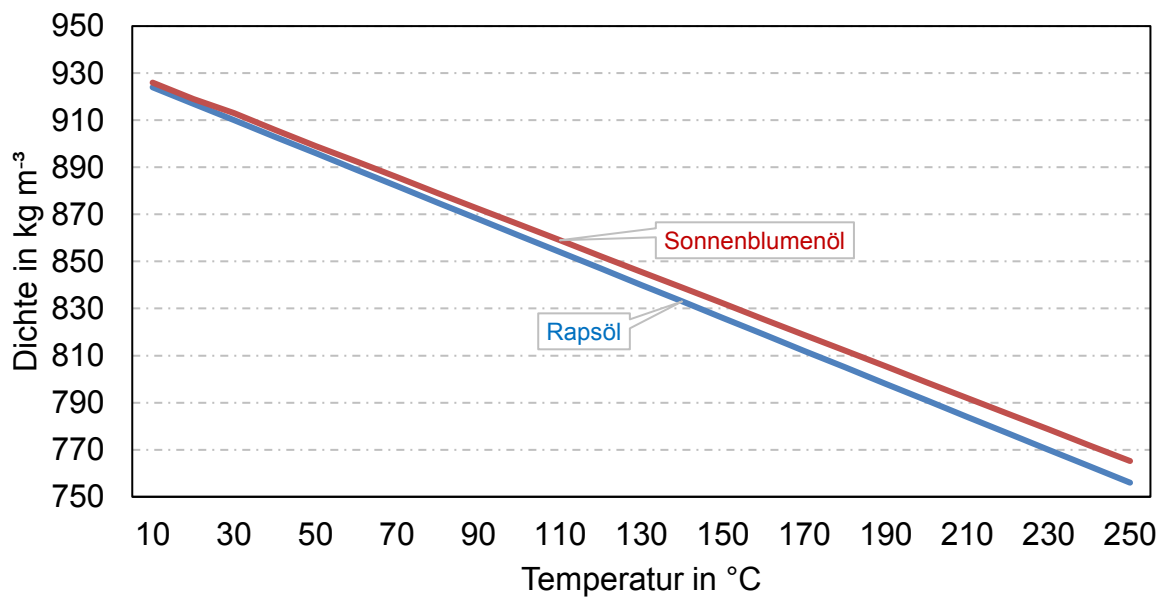


Abb. 21: Dichte-Temperatur-Diagramm von Raps- und Sonnenblumenöl

### Verwendung nachhaltig produzierter Pflanzenöle

Ein weiteres, wesentliches Auswahlkriterium für die Verwendung von Pflanzenöl als Energieüberträger ist die Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Faktoren. Viele der untersuchten Pflanzenöle werden außerhalb Europas produziert was einen negativen carbon footprint verursacht. Sowohl Raps als auch Sonnenblumen werden dagegen innerhalb Europas in ausreichender Menge und nachhaltig angebaut. Der Produktionsablauf ist dabei durch einen hohen Mechanisierungsgrad gekennzeichnet. Die Ölerzeugung findet häufig regional in Ölmühlen statt, was eine deutliche Reduktion der Transportwege nach sich zieht. Diese Gründe tragen unter anderem dazu bei, dass der Kaufpreis von Raps- und Sonnenblumenöl im Vergleich zu einer Vielzahl an importierten Speise- und Genussölen signifikant günstiger ist. Darüber hinaus kann eine weitere Kosteneinsparung durch den Kauf großer Gebinde (> 100 l) erzielt werden, was derzeit zu Literpreisen < 1,20 € führen kann (Tab. 4). Ein weiterer, positiver Aspekt der Heißölapplikation ist, dass Landwirte auf Ihren eigenen Äckern den Rohstoff zur Bekämpfung von Unkräutern produzieren können was zu einer tiefgreifenderen Wertschöpfungskette führen kann.

### Erwärmungsverhalten von Pflanzenöl im Vergleich zu Wasser

Die experimentellen Erwärmungsversuche mit Wasser (Spezifische Wärmekapazität  $c = 4190 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) sowie Raps- und Sonnenblumenöl (Spezifische Wärmekapazität  $c = 1970 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) haben gezeigt, dass beide Pflanzenöle auf Grund ihrer um 53 % geringeren Wärmekapazität, bei gleichem Energieinput, ca. 30 % schneller und somit deutlich energieeffizienter auf eine Temperatur von 100 °C gebracht werden können (Abb. 22). In einem

Zeitraum von 6 Minuten wurde Wasser ( $m = 0,1 \text{ kg}$ ) von  $25 \text{ °C}$  auf eine Temperatur von  $99 \text{ °C}$  erwärmt ( $\Delta T = 74 \text{ K}$ ). Dies entspricht einer Wärmeaufnahme  $\Delta Q$  gemäß Gleichung 1 von  $31 \text{ kJ}$ . Dagegen erreichten Raps- und Sonnenblumenöl in der gleichen Zeit bereits eine Temperatur von ca.  $148 \text{ °C}$  bei einer Wärmeaufnahme von  $24,23 \text{ kJ}$ .

Das schnelle und im Vergleich zu Wasser energieärmere Aufheizen sowie das Erreichen von Temperaturen  $> 200 \text{ °C}$  verdeutlichen das Potential von Pflanzenöl als Trägerstoff von Wärme für eine thermische Unkrautbekämpfung mittels Spritzapplikation.

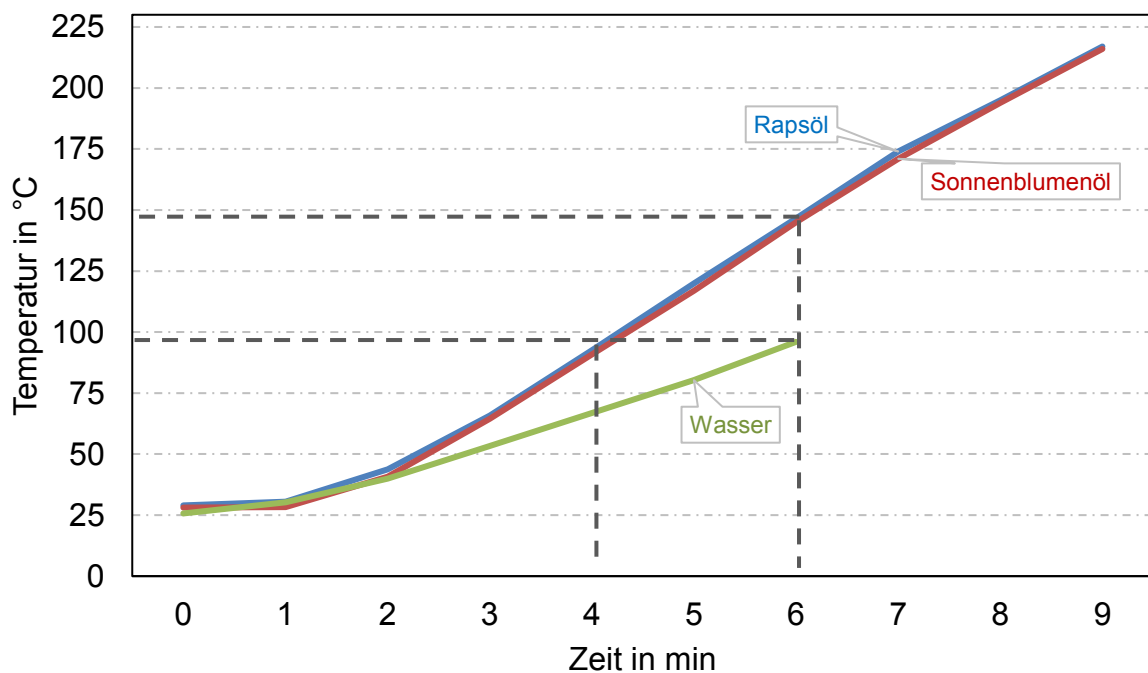


Abb. 22: Aufheizgeschwindigkeit von jeweils 100 ml Wasser, Sonnenblumen- und Rapsöl

Auf Grund der sehr ähnlichen physikalischen und ökologischen Eigenschaften von Raps- und Sonnenblumenöl sind keine signifikanten Unterschiede bei der Wärmeübertragung und dem Anlagerungsverhalten bei der thermischen Unkrautbekämpfung zu erwarten. Daher wurden alle weiteren Applikationsversuche ausschließlich mit Rapsöl durchgeführt.

### 3.2 Dosiergenauigkeit der Peristaltikpumpe

In experimentellen Untersuchungen mit der Laborapplikationseinheit wurde die Dosiergenauigkeit der Peristaltikpumpe überprüft. Diese weist einen sehr gleichmäßigen Förderstrom auf. Die Erzeugung reproduzierbarer Aufwandmengen sowohl bei Verwendung eines Vollstrahls als auch in einzelnen Tropfen bedurfte jedoch einer Modifikation dieser

Technik. Hierfür wurde ein Motorsteuergerät zur genaueren Ansteuerung der Peristaltikpumpe entwickelt und in weiteren Applikationsversuchen mit Pflanzenöl und verschiedenen Düsen untersucht. Durch diese technische Modifikation war es fortan möglich exakte Dosiermengen reproduzierbar zu erzeugen. Die nachträgliche Aufrüstung der Motoreinheit mit einem elektrischen Lüfter erhöhte zudem die Einsatzsicherheit der Peristaltikpumpe im Dauerbetrieb.

### 3.2.1 Entwicklung geeigneter Düsen für die Heißölapplikation

In mehreren Entwicklungsschritten wurden Applikationsdüsen hergestellt und auf ihre Eignung geprüft. Eine wesentliche Anforderung ist das zielgenaue und dadurch ressourcenschonende Ausbringen von Pflanzenöl auf Unkrautpflanzen. Hierfür muss das Öl unabhängig von der Aufwandmenge absolut gleichmäßig von der Düse abtropfen können. Dabei hat neben thermophysikalischen und fluidmechanischen Eigenschaften vor allem die Form der Applikationsdüse einen wesentlichen Einfluss auf das Abtropfverhalten. Bei der Entwicklung und der experimentellen Erprobung unterschiedlicher Düsenbauformen hat sich eine längliche ( $L > 10$  mm) und spitz zulaufende Düsenform mit Lochdurchmessern zwischen 0,2 mm und 0,3 mm als besonders geeignet für die Einzeltropfenbildung bei erhitztem Pflanzenöl erwiesen (Nr. 6, Abb. 23).

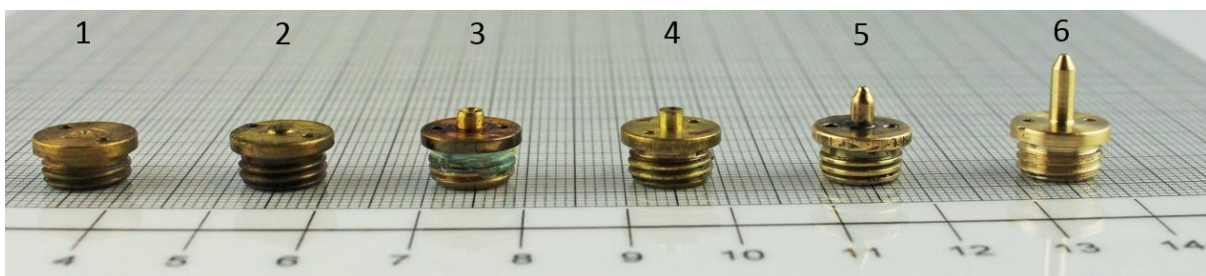


Abb. 23: Entwicklungsschritte einer geeigneten Applikationsdüse mit Einschraubgewinde

Bei größeren Lochdurchmessern ( $> 0,5$  mm) kam es in Verbindung mit niederviskosen Flüssigkeiten (Viskosität  $< 80$  mPas s) zu einem erhöhten Durchfluss. Dies führte dazu, dass die gezielte Erzeugung einzelner Tropfen vermehrt nicht möglich war und sich erst kurz nach der Düse eine ungleichmäßige Tropfenfolge gebildet hat (Abb. 24).



Abb. 24: Ungleichmäßige Tropfenfolge bei 0,5 mm Düsenlochdurchmesser

Mit Hilfe von Detailaufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera konnte festgestellt werden, dass Öltropfen bei einer kurzen, abgeflachten (Nr. 1, Nr. 2, Nr. 4, Abb. 23) oder konkaven Applikationsdüse (Nr. 3, Abb. 23) im Vergleich zu einer spitz zulaufenden Düse (Nr. 5, Abb. 23) auf Grund einer deutlich größeren Anhaftungsfläche signifikant schlechter abreißen. Während des Abtropfens bildet sich zudem ein zweiter, sehr viel kleinerer Nachtropfen (Abb. 25). Dies liegt möglicherweise an der geringen Oberflächenspannung von Pflanzenöl ( $31,5 \text{ mNm}^{-1}$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) was insgesamt zu einer instabileren Tropfenform führt. Darüber hinaus begünstigt eine lange und spitze Düsenform ein ungewolltes „Hochwandern“ einzelner Tropfen entlang des Düsenschafte in Richtung Hohlpatronenboden und die dortige Bildung eines kumulierenden Öltropfens, der unkontrolliert abreißt (Abb. 26).

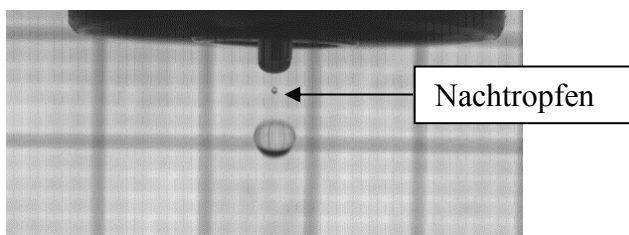


Abb. 25: Kurze, konkave Düse mit Nachtropfen

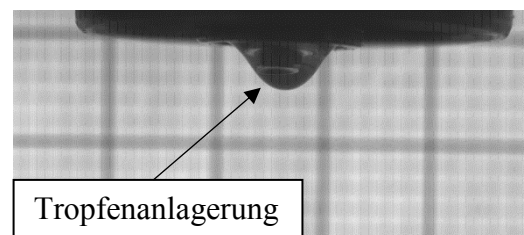


Abb. 26: Anlagerung eines Öltropfens am Hohlpatronenboden

Experimentelle Versuche mit verschiedenen Applikationsdüsen haben bestätigt, dass neben der Düsenform vor allem auch die Viskosität der Öle einen entscheidenden Einfluss auf das Abtropfverhalten hat. Mit abnehmender Viskosität (Temperaturerhöhung) reißen die Tropfen früher von der Düsenspitze ab, was sich auf die Tropfengröße und das Gewicht auswirkt. Durch das Verwiegen einzelner Tropfen mit einer Feinwaage (Sartorius) bei Temperaturen von 20, 100, 150, 200 und 250  $^\circ\text{C}$  und 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) deutlich abnimmt (Abb. 27). Folglich können aus 1 ml Pflanzenöl zwischen 58 (bei 20 °C) und 90 Öltropfen (bei 250 °C) generiert werden. Auch bei dieser Untersuchung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Raps- und Sonnenblumenöl festgestellt werden.

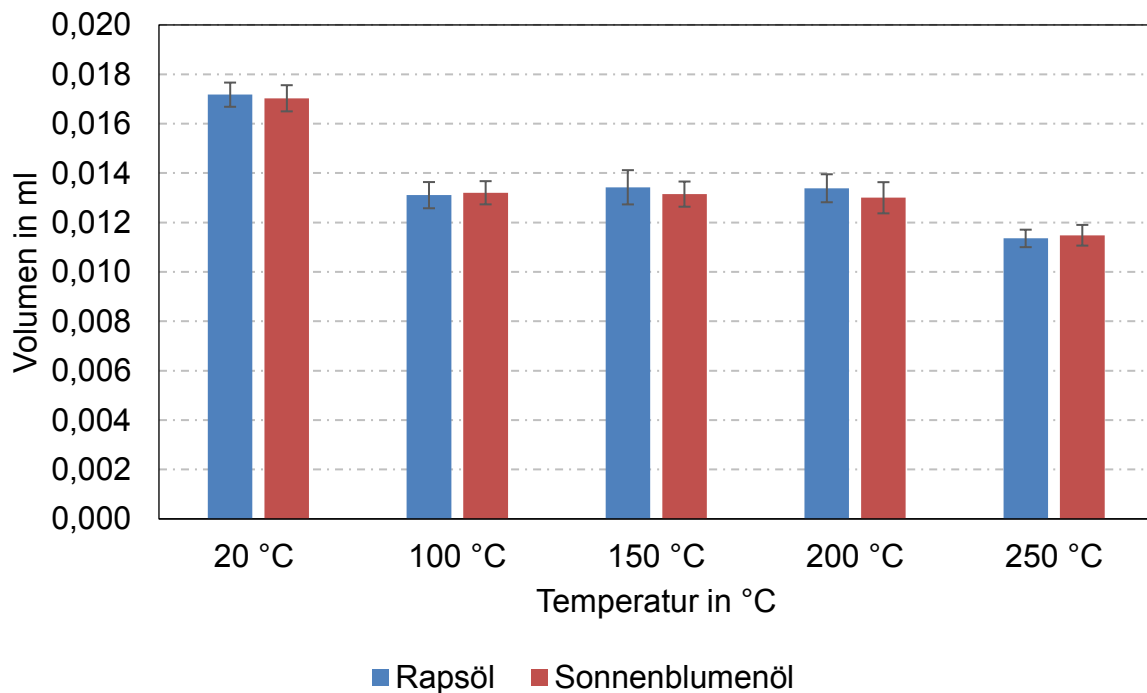


Abb. 27: Vergleich des Tropfenvolumens von Raps- und Sonnenblumenöl in Abhängigkeit der Flüssigkeitstemperatur (n = 30)

### 3.2.2 Bestimmung der Energiemenge von Öltropfen

Neben dem Tropfenvolumen hat auch die Energiemenge, die in einem einzelnen Tropfen enthalten ist, einen wesentlichen Einfluss auf den Bekämpfungserfolg von Unkräutern. Energieverluste in Form von Wärme traten vor allem bei länglichen Düsenformen (Nr. 6, Abb. 23) auf. Im Vergleich zu einer flachen Düse (Nr. 1, Abb. 23) verliert das Pflanzenöl hier ca. 4 % bezogen auf seine Ausgangstemperatur ( $T = 250 \text{ °C}$ ). Unter Beachtung der abnehmenden Dichte beträgt die abzugebende thermische Energie eines einzelnen Pflanzenöltropfens gemäß Gleichung 1 zwischen 2,82 J ( $\Delta T = 130 \text{ K}$ ) und 4,08 J ( $\Delta T = 230 \text{ K}$ ), die bei einer wärmewirksamen Applikation auf Unkrautpflanzen bei Raumtemperatur (20 °C) theoretisch übertragen werden kann ohne Berücksichtigung der Verluste durch äußere Einflüsse.

### 3.2.3 Abkühlverhalten von Pflanzenöl im freien Fall

Messungen mit der Thermokamera haben ergeben, 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 können. Dies liegt im Wesentlichen an der geringen Masse eines einzelnen Öltropfens von ca. 0,009 g ( $T = 250\text{ °C}$ ) mit einer vergleichsweise großen Oberfläche von etwa  $0,24\text{ mm}^2$  beim Kontakt mit der Umgebungsluft. Dabei kühlen die Tropfen äußerlich deutlich stärker ab als im Kern. Für eine erfolgreiche, thermische Unkrautbekämpfung durch Eiweißdenaturierung muss eine möglichst lange Wärmeübertragung ( $T > 45\text{ °C}$ ) durch heißes Öl 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.

In Abb. 28 ist zu erkennen, dass ein auf  $250\text{ °C}$  erwärmter Rapsöltropfen (blauer Graph) auf seinem Weg zur Pflanzenoberfläche (Fallhöhe 15 cm,  $20\text{ °C}$  Umgebungstemperatur) auf  $80\text{ °C}$  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  $45\text{ °C}$  abkühlt und damit eine weitere Eiweißdenaturierung ausgeschlossen wird.

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

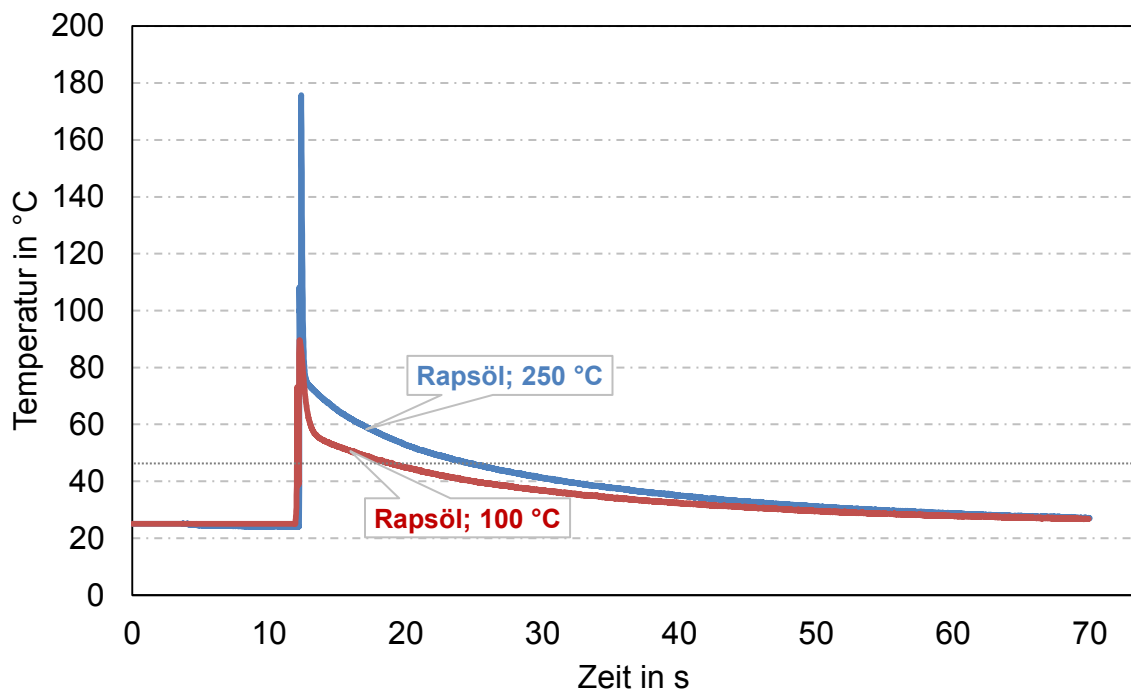


Abb. 28: Abkühlverhalten von Rapsöl (1 Tropfen, 15 cm Fallhöhe)

Abbildung 29 zeigt die gleiche Versuchsanlage wie in Abbildung 28 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 tropfenweisen, gesteigerten Eintrag von Wärmeenergie. Infolge der Summierung der Einzeltropfenenergie, insbesondere der im Vergleich zur Außenhülle erhöhten Tropfenkerntemperatur, kommt es zudem zu einem verzögerten Abkühlungsprozess was eine länger anhaltende und deutlich intensivere Pflanzenschädigung bewirkt.

Bei einer Ausgangstemperatur von 250 °C (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 Zieboberfläche unter 45 °C abfällt. Im Gegensatz dazu beträgt die unkrautschädigende Verweildauer von Pflanzenöl bei einer Ausgangstemperatur von 100 °C (roter Graph) mit einem Temperaturverlust im freien Fall von ca. 30 % ca. 18 Sekunden.



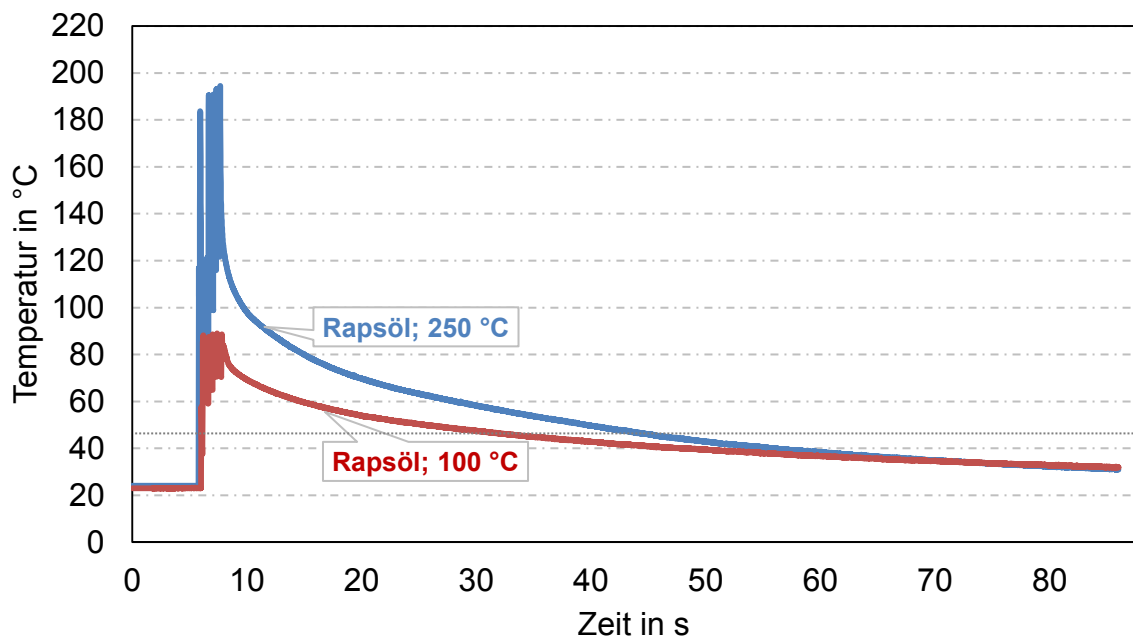


Abb. 29: Abkühlverhalten von Rapsöl (5 Tropfen, 15 cm Fallhöhe)

### 3.3 Erste Laborapplikationsversuche mit heißem Pflanzenöl

Zum Ende des 1. Forschungsjahres wurde die Heißölapplikationstechnik an ausgewählten Unkräutern wie beispielsweise Hirtentäschel oder Löwenzahn getestet. Dabei zeigte sich, dass das Wachstumszentrum bei Dikotyledonen der effektivste Bekämpfungsort bezogen auf die Schadwirkung in Abhängigkeit der Ölaufwandmenge ist (Abb. 30 und Abb. 31). Zudem konnte nachgewiesen werden, dass der Bekämpfungserfolg mit zunehmendem Pflanzenalter bei gleicher Ölaufwandmenge abnimmt. Diese ersten Versuchsergebnisse waren Anlass für die Fortführung des Forschungsprojektes für ein weiteres Jahr mit dem Ziel der Untersuchungsausweitung bezogen auf den Einfluss heißer Öle auf Unkrautpflanzen.



Abb. 30: Pflanze vor Applikation

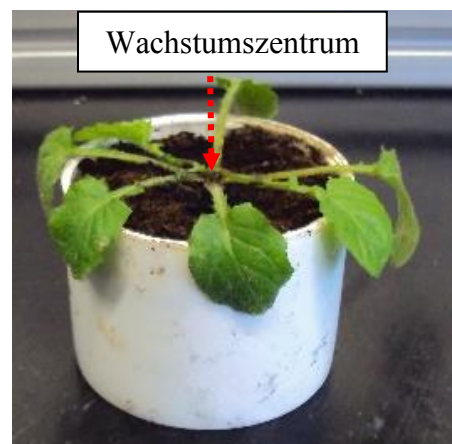


Abb. 31: Pflanze nach Applikation

### 3.4 Anlagerungsverhalten auf der Pflanzenoberfläche

Neben dem zielgenauen und volumendosierten Applizieren heißer Öle auf ausgewählte Pflanzenorgane wie beispielsweise Blatt, Stängel, Wurzelhals oder Wachstumszentrum sind das Anlagerungsverhalten und der Benetzungsgrad weitere wichtige Einflussparameter. Die erfolgreiche Übertragung von Wärmeenergie kann nur erfolgen wenn die Trägerflüssigkeit optimal auf die Pflanzenoberfläche aufgebracht wird und dort anhaften kann. Auf Grund der im Vergleich zu Wasser geringeren Oberflächenspannung kann sich Rapsöl besonders gut auf der Pflanzenoberfläche anlagern. Experimentelle Versuche mit eingefärbten Rapsöl haben gezeigt, dass sich der Öltropfen unmittelbar nach dem Aufprall breitflächig verteilt und somit vor allem die im Kern konzentrierte Wärmeenergie freisetzen kann. Durch das Aufplatzen und Zerlaufen des Öltropfens wird jedoch eine deutlich größere Fläche auf der Pflanze benetzt, sodass einerseits eine flächigere Schädigung eintritt andererseits die Energie weniger punktuell übertragen werden kann. Aus den vorherigen Untersuchungen wurden bei Dikotyledonen das Wachstumszentrum und bei Monokotyledonen der Wurzelhals als besonders geeigneter Ort für eine Heißölanwendung bestimmt. Schädigungen einzelner Blätter oder Halme führten in vielen Fällen nicht zum Absterben der gesamten Pflanze. Auf Grund der geringen Oberfläche des Wachstumszentrums beziehungsweise des Wurzelhalses ist der Benetzungsgrad bei Rapsöl mit einer niedrigen Oberflächenspannung signifikant größer im Vergleich zu Wasser. Dies ist besonders bei behaarten oder bewachsenen Pflanzenorganen vorteilhaft, da der Ölfilm bis auf das Pflanzengewebe durchdringt und sich kein Luftpolster zwischen Öltropfen und Pflanzenoberfläche bildet (Abb. 32).

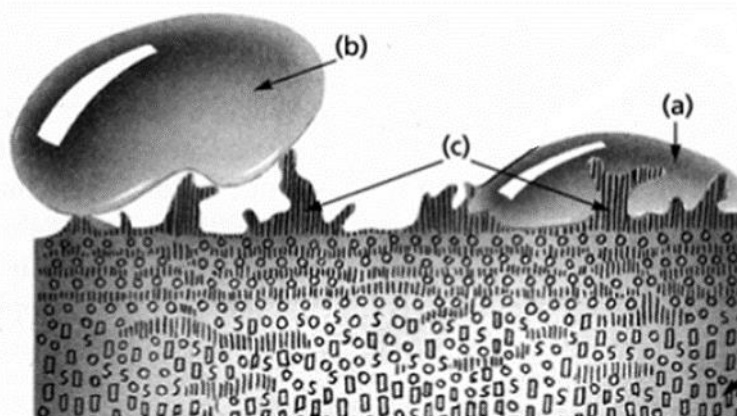


Abb. 32: Tropfenanlagerung mit unterschiedlicher Oberflächenspannung: (a) Tropfen mit geringer Oberflächenspannung (bspw. Öl), (b) Tropfen mit hoher Oberflächenspannung (bspw. Wasser), (c) raue Pflanzenoberfläche (verändert nach Franke, 1967)

In weiteren Untersuchungen konnte das Aufprall- und Anlagerungsverhalten in Abhängigkeit des Blattstellungswinkels visuell analysiert werden. Die Verstellung des Anstellwinkels der Vakuumplatte zeigte, dass sich bei flachen Anstellwinkeln ( $< 30^\circ$ ) die Rapsöltropfen kreisrund verteilten und näherungsweise punktuell auf der Pflanzenoberfläche verblieben. Bei Blattstellwinkel zwischen  $30$  und  $60^\circ$  begannen die Tropfen unmittelbar nach dem Aufprall auf einem schmalen Streifen abwärts zu laufen. Die gespeicherte Wärmeenergie wird hierbei auf eine signifikant größere Fläche verteilt. Dadurch wird die unkrautschädigende Wirkung deutlich reduziert. Blattstellwinkel  $> 60^\circ$  führten zu einem sofortigen Abfließen des Öltropfen ohne, dass Wärmeenergie über einen längeren Zeitraum auf die Pflanze übertragen werden konnte. Die Applikation mehrerer Tropfen hintereinander führte nur bei einer annähernd horizontalen Blattstellung zu einer verstärkten Schädigung, da sich hierbei das Öl punktuell anlagern konnte ohne direkt von der Pflanzenoberfläche abzufließen.

Bei Monokotyledonen erfolgte die Heißölapplikation oberhalb des Wurzelhalses. Auf Grund der Benetzung mit einzelnen Tropfen mussten die senkrecht stehenden Halme zunächst manuell gebogen werden um den Stängel gezielt benetzen zu können. Die geringen Halmdurchmesser von  $0,5 - 2$  mm teilten dabei die meisten Öltropfen in zwei Hälften, sodass nur ein geringer Anteil der Trägerflüssigkeit an der Pflanze anhaften konnte. Die Wärmeübertragung reichte dennoch aus um eine letale Schädigung der Gesamtpflanze zu erzielen.

### **3.5 Heißölapplikation an ausgewählten Unkräutern**

#### **3.5.1 Einfluss der Pflanzenklasse auf den Bekämpfungserfolg**

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der tropfenweisen Heißölapplikation an den 6 ausgewählten Versuchsunkräutern zusammengefasst dargestellt. Die Abbildung 33 zeigt anhand des Wirkungsgrades in Prozent wie effektiv die Unkrautbekämpfung mit heißem Öl bei einem dikotylen Unkraut (Kornblume) nach 7, 14 und 21 war. Bei dieser Versuchsvariante wurden  $0,03$  ml Rapsöl mit einer Temperatur von  $200^\circ\text{C}$  in 28-facher Wiederholung in das Wachstumszentrum der jungen Kornblumenpflanze (2 Blattstadium) appliziert. Bereits nach 7 Tagen betrug der Wirkungsgrad  $96\%$  was darauf zurückzuführen ist, dass eine einzelne Kornblumenpflanze stark geschädigt überlebt hat. Bis zum Abschluss der 3 wöchigen Bonitur blieb der Wirkungsgrad dieser thermischen Unkrautbekämpfungsmaßnahme konstant, was ein sehr gutes Ergebnis darstellt.

Um den Einfluss und die Schädigung von heißen Ölen auf die Pflanzenklasse bestimmen zu können wurde bei gleichen Parametern ein monokotylen Unkraut (Deutsches Weidelgras) mit heißen Pflanzenöl bekämpft und die Ergebnisse (Abb. 34) miteinander verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass 7 Tage nach der Behandlung nur etwa ein Drittel der behandelten Pflanzen

abgestorben waren was einem Wirkungsgrad von etwa 35 % entspricht. Die übrigen Pflanzen wiesen zu diesem Zeitpunkt jedoch eine starke Schädigung auf. In der darauffolgenden Woche stieg die Mortalitätsrate auf über 95 % was daran lag, dass die zuvor stark geschädigten Grashalme in diesem Zeitraum bis auf eine Ausnahme komplett abstarben. Zum Abschluss der Bonitur nach 21 Tagen betrug der Wirkungsgrad 96 %. Eine 100 prozentige Unkrautregulierung konnte nicht erzielt werden, da ein einzelner Weidelgrashalm nur geringfügig während der Applikation geschädigt wurde und sich in den folgenden 3 Wochen wieder regenerieren konnte was durch die lückenlose Fotodokumentation belegt werden konnte (Abb. 35 und 36).

Verglichen mit dem dikotylen Unkraut tritt beim monokotylen Ungras eine letale Schädigung signifikant später ein. Diese Beobachtung konnte bei allen durchgeführten Versuchsreihen festgestellt werden, was auf eine schlechtere Tropfenanlagerung an den senkrecht stehenden Stängeln und größere Spritzverluste beim Aufprall zurückzuführen ist. Das Wachstumszentrum bei dikotylen Unkräutern ist überwiegend kelchförmig ausgebildet und bietet daher eine gute und großflächige Trefferfläche für die applizierten Öltropfen. Darüber hinaus wird ein schnelles Abfließen verhindert was zu einer deutlich längeren Wärmeeinwirkung führt und somit die Schädigung auf der Pflanzenoberfläche begünstigt.

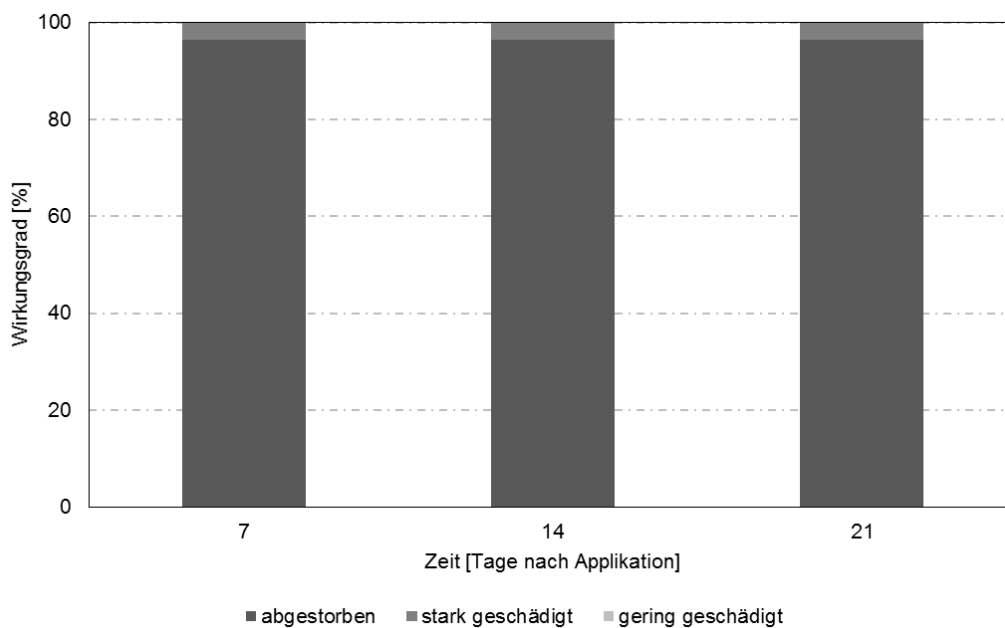


Abb. 33: Kornblume im 2-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 200 °C

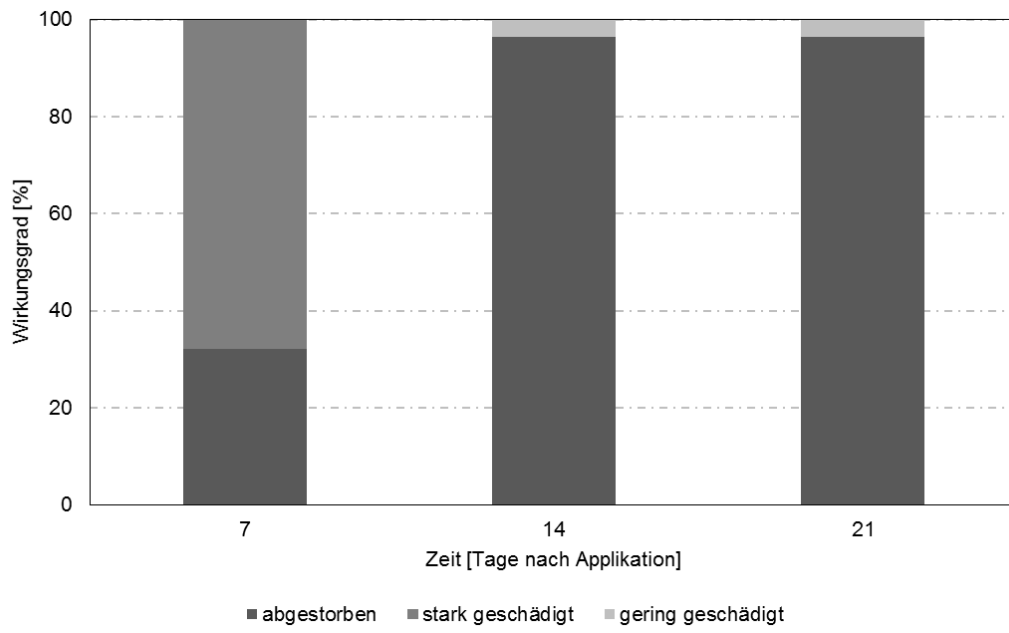


Abb. 34: Deutsches Weidelgras im 2-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 200 °C

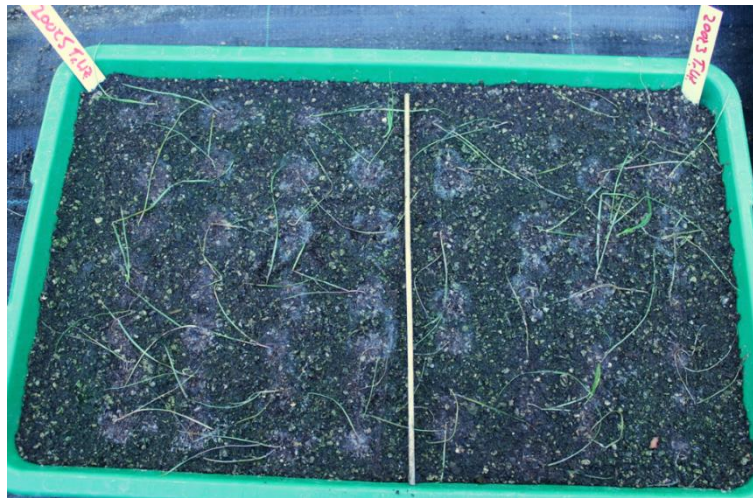


Abb. 35: Deutsches Weidelgras, 7 Tage nach Applikation



Abb. 36: Deutsches Weidelgras, 21 Tage nach Applikation

### 3.5.2 Einfluss des Pflanzenalters auf den Bekämpfungserfolg

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss des Pflanzenalters auf die schädigende Wirkung der Heißölapplikation untersucht. Dazu wurden alle Unkräuter jeweils im Keimblatt-, 2-Blatt-, 4-Blatt- und 6-Blattstadium unter identischen Bedingungen mit 0,03 ml und 200 °C heißem Öl behandelt. Der Vergleich zwischen den einzelnen Wachstumsstadien einer Kultur zeigt anschließend welchen Einfluss das Pflanzenalter auf den Bekämpfungserfolg hat. Am Beispiel des Weidelgrases ist gut zu erkennen, dass der Wirkungsgrad im 2-Blattstadium (Abb. 37) von 35 % (7 Tage nach Applikation) auf 96 % (21 Tage nach Applikation) ansteigt. Im Vergleich zur Variante im 6-Blattstadium welche nach 21 Tagen lediglich einen Wirkungsgrad von unter 40 % aufweist (Abb. 38) ist deutlich der schlechtere Bekämpfungserfolg zu erkennen. Daraus kann geschlossen werden, dass ältere und somit größere beziehungsweise stärkere Pflanzen deutlich widerstandsfähiger gegenüber einer thermischen Unkrautbekämpfung mit heißem Öl sind als junge Pflanzen.

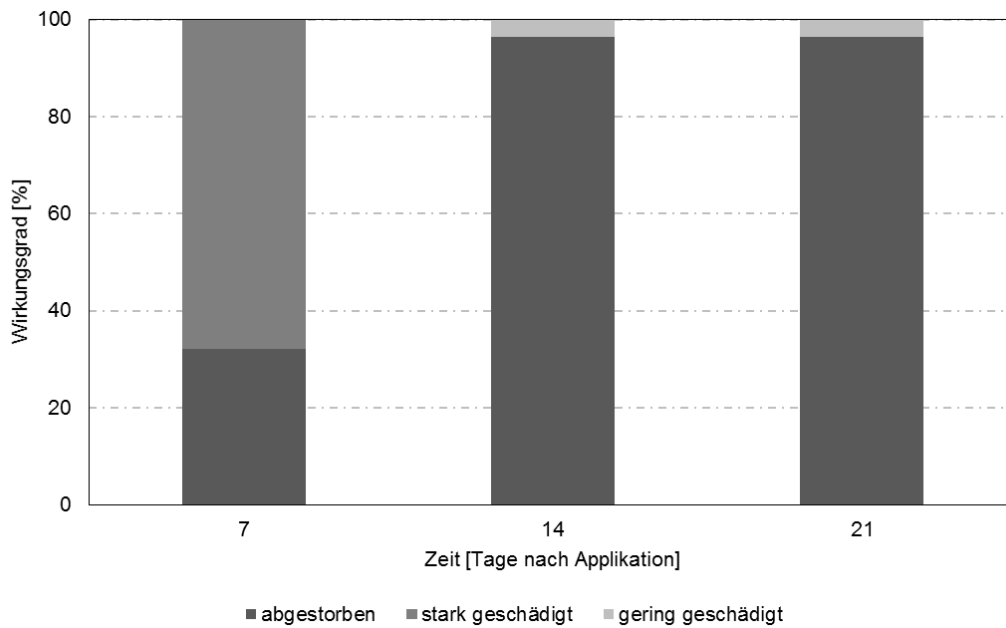


Abb. 37: Weidelgras im 2-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 200 °C

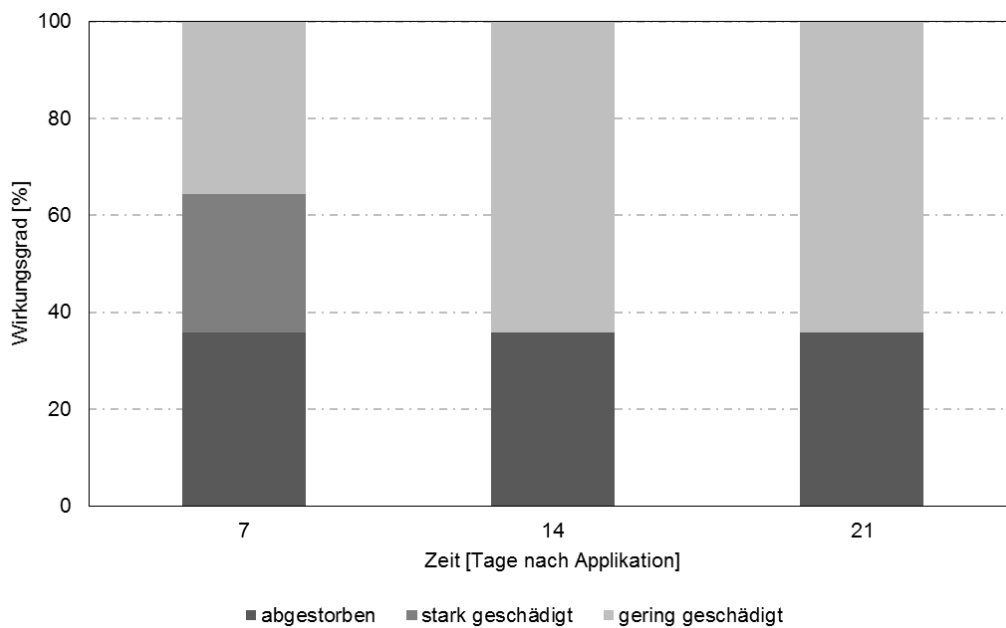


Abb. 38: Weidelgras im 6-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 200 °C

Der Trend, dass ältere Unkräuter pflanzenklassenübergreifend einen schlechteren Wirkungsgrad bei der Bekämpfung mit heißen Ölen aufweisen als junge Pflanzen ist aus den Abbildungen 39 und 40 gut ersichtlich. In Abbildung 39 weisen die beiden untersuchten

monokotylen Ungräser mit 75 und 96 % einen schlechteren Wirkungsgrad auf als alle dikotylen Unkräuter. Jene konnten mit 0,03 ml und 200 °C heißem Öl zu 100 % letal geschädigt werden.

Sobald das Pflanzenalter und somit auch die Pflanzengröße zunehmen (6-Blattstadium) sinkt der Bekämpfungserfolg bei gleicher Aufwandmenge und Öltemperatur kulturübergreifend signifikant ab (Abb. 40). Nur Löwenzahn konnte unter diesen Bedingungen noch zu einhundert Prozent reguliert werden. Insgesamt liegen die Wirkungsgrade der monokotylen Unkräuter mit 35 % mindestens 50 % unter denen der dikotylen Unkräuter, sodass ein eindeutiger Einfluss des Pflanzenalters auf den Bekämpfungserfolg nachgewiesen werden konnte.

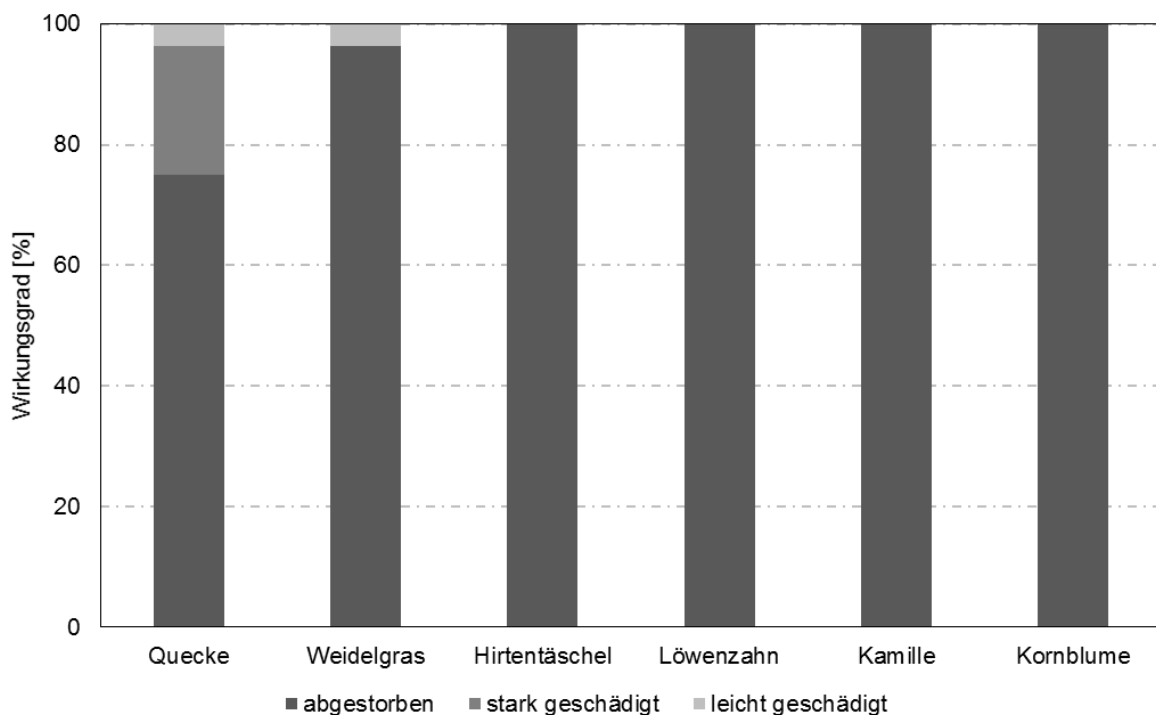


Abb. 39: Versuchsunkräuter und -ungräser im 2-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 200 °C



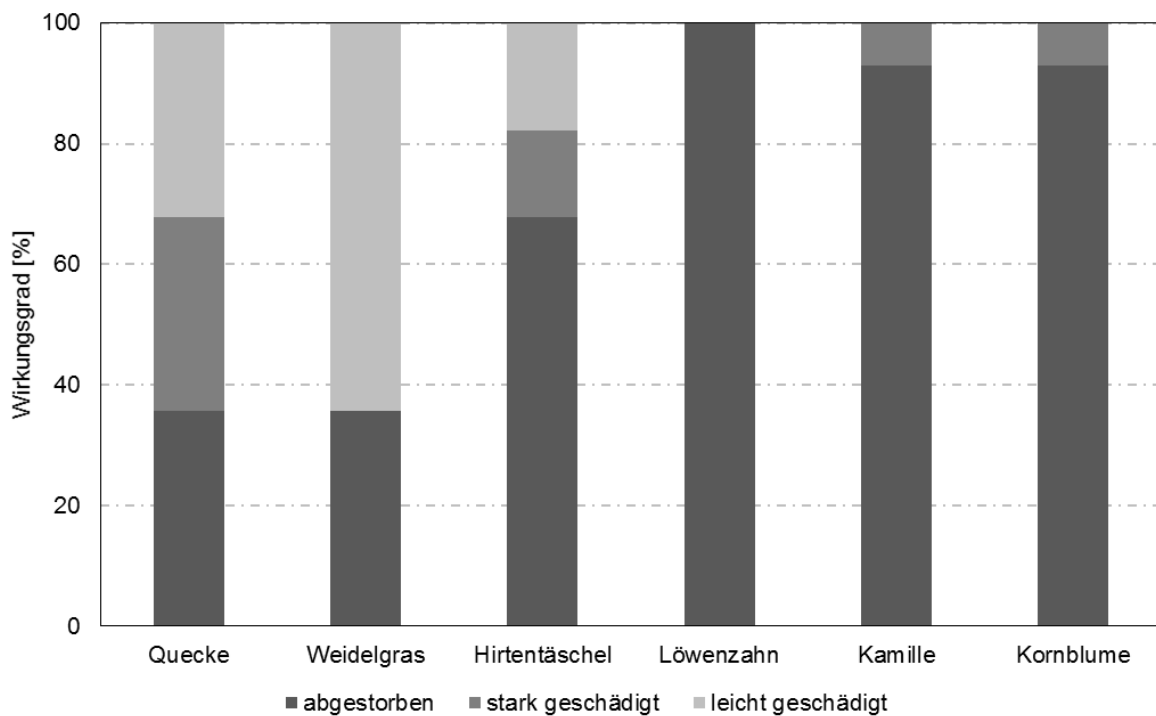


Abb. 40: Versuchsunkräuter und -ungräser im 6-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 200 °C

### 3.5.3 Einfluss der Aufwandmenge auf den Bekämpfungserfolg

In weiteren Laborversuchen wurde untersucht wie der Wirkungsgrad am effizientesten bei zunehmendem Pflanzenalter gesteigert werden kann. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder man steigert die Ölaufwandmenge und versucht darüber eine höhere Energiemenge auf die Unkrautpflanze zu übertragen oder man hebt die Öltemperatur an. Um zu untersuchen welches dieser beiden Verfahren den größeren Effekt aufweist wurde zunächst im 6- Blattstadium die Ölaufwandmenge von 0,03 auf 0,1 ml bei 200 °C gesteigert (Abb. 41). Verglichen mit Abbildung 40 konnte durch diese Maßnahme der Wirkungsgrad bei allen getesteten Kulturen auf 100 % angehoben werden. Eine Verdreifachung der Ölaufwandmenge hat demnach einen äußerst positiven Effekt auf die Unkrautschädigung.

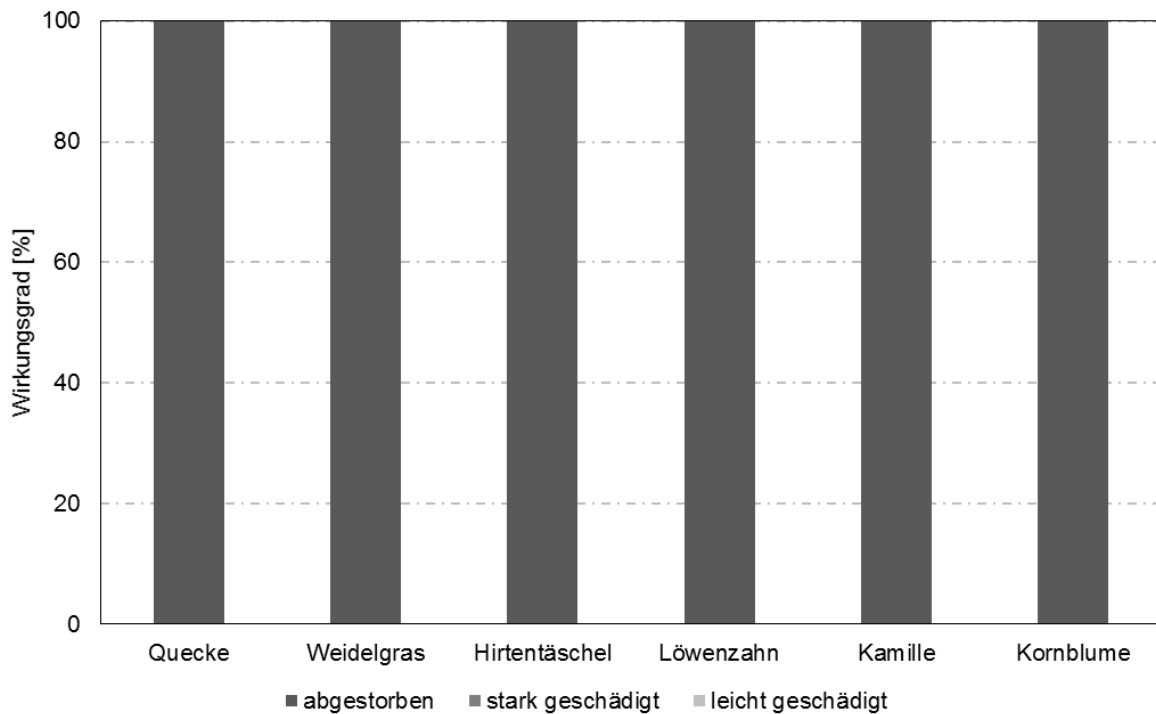


Abb. 41: Versuchsunkräuter und -ungräser im 6-Blattstadium, Aufwandmenge 0,1 ml bei 200 °C

### 3.5.4 Einfluss der Öltemperatur auf den Bekämpfungserfolg

Ausgehend von Abbildung 40 wurde anschließend auch die Öltemperatur angehoben um deren Einfluss auf eine Unkrautschädigung zu bestimmen. Dabei konnte die Temperaturerhöhung aus Sicherheitsgründen nur auf maximal 250 °C erfolgen. Abbildung 42 zeigt deutlich, dass eine Temperaturerhöhung von 200 auf 250 °C einen wesentlich geringeren Effekt auf den Bekämpfungserfolg hat als die Steigerung der Ölaufwandmenge. Bei 250 °C Öltemperatur sind bei Monokotyledonen nach 21 Tagen maximal 60 % Wirkungsgrad zu erzielen. Bei Dikotyledonen lag der Bekämpfungserfolg dagegen zwischen 90 und 100 %. Unter Betrachtung der letalen Schadwirkung ist es demnach sinnvoller die Aufwandmenge für einen gesteigerten Bekämpfungserfolg zu erhöhen als die Temperatur auf das Maximum von 250 °C anzuheben.

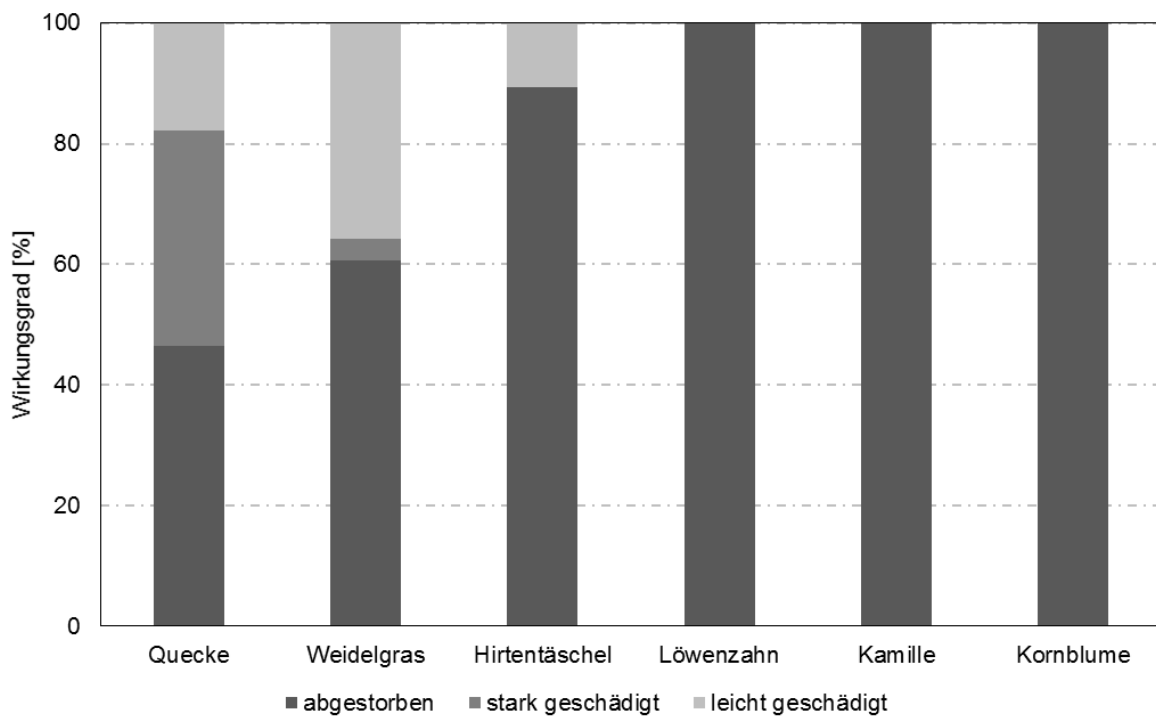


Abb. 42: Versuchsunkräuter und -ungräser im 6-Blattstadium, Aufwandmenge 0,03 ml bei 250 °C

Ein weiterer Versuch zur Absenkung der Öltemperatur unter 200 °C zeigte eine signifikant geringere Pflanzenschädigung. Bei einer Temperatur von 150 °C muss die Ölaufwandmenge deutlich angehoben werden (> 0,5 ml je Unkraut) um eine ausreichende pflanzenschädigende Wirkung > 50 % zu erzielen. Dieser Mehraufwand an Öl ist jedoch nicht im Sinne eines selektiven und umweltfreundlichen Bekämpfungsverfahrens, zumal daraus resultierende, negative Auswirkungen auf die Bodenoberfläche (Verklumpungen, reduziertes Porenvolumen) sowie die Bodenlebewesen durch größere Verlustölmengen nicht auszuschließen sind. Die Untersuchungen zum Abbauverhalten von Pflanzenölen soll daher klären, welche Aufwandmengen noch verträglich für die Umwelt sind.

Zusammengefasst haben die Unkrautbekämpfungsversuche im Labor gezeigt, dass eine deutliche und effektive Schädigung von Unkräutern mit einer tropfenweisen Heißölapplikation möglich ist. Dabei lassen sich dikotyle Unkräuter auf Grund ihrer Wuchsform zumeist besser mit heißem Öl benetzen was zu höheren Wirkungsgraden als bei Monokotyledonen führt. Darüber hinaus ist der Einfluss des Pflanzenalters kulturübergreifend stärker zu bewerten als der Einfluss der Ölaufwandmenge. Im Vergleich dazu zeigt das Anheben der Öltemperatur von 200 auf 250 °C eine signifikant geringere Wirkung auf das Absterben der Unkräuter. Nahezu unbedeutend ist die Beschaffenheit der Pflanzenoberfläche. Bei den untersuchten Unkräutern gab es keine Hinweise darauf, dass eine behaarte beziehungsweise glatte Blattoberfläche einen Einfluss auf die Temperatureinwirkung durch heißes Öl hat. Der Blattstellungswinkel hat bei

der Applikation in das Wachstumszentrum von Dikotyledonen keinen relevanten Einfluss. Steil stehende Blätter begünstigen sogar das Benetzen des Wachstumszentrums indem sie die Tropfen dorthin geleiten. Bei Monokotyledonen sind senkrecht stehende Stängel ein Problem, da einzelne Öltropfen nicht vertikal auf den Bereich oberhalb des Wurzelhalses appliziert werden konnten.

Der Gesamtwirkungsgrad der Heißölapplikation lag über alle Versuche hinweg bei durchschnittlich 93 %.

### **3.6 Wirtschaftliche Bewertung der Heißölapplikation**

Eine ökonomische Bewertung der thermischen Unkrautbekämpfung durch eine Heißölapplikation konnte aufgrund einer Vielzahl von Annahmen nicht durchgeführt werden. Zum einen müssen zu viele technisch physikalische Einflussparameter (Fallhöhe, Öltemperatur, Aufwandmenge etc.) geschätzt werden, zum anderen ist derzeit noch keine felddaugliche Konzeptstudie vorstellbar. Hierfür müsste zunächst eine mögliche Arbeitsbreite der Applikationseinheit festgelegt und eine daran angepasste Dimensionierung der übrigen Bauteile (Öltank, Anzahl der Applikationsdüsen, Steuer-, Regel- und Heiztechnik etc.) vorgenommen werden. Wichtig für den Feldeinsatz sind ein zuverlässig arbeitendes und hoch präzises Unkrautererkennungssystem sowie eine autarke Energieversorgung. Zudem sind viele der verwendeten Bauteile individuell angefertigte Einzelstücke sodass hierfür kein realistischer Kaufpreis veranschlagt werden kann was eine derzeitige Kostenkalkulation unmöglich macht.

Die Ergebnisse der praktischen Unkrautbekämpfungsversuche im Labor lassen jedoch eine ökonomische Bewertung der Ölaufwandmenge in Abhängigkeit der Unkrautdichte zu. Hierfür wurden 3 Szenarien angenommen. Um eine Unkrautschädigung durch heiße Öle zu erzielen wurden drei Aufwandmengen 0,03, 0,05 und 0,1 ml je Unkrautpflanze im Laborversuch festgelegt. Bei einer Unkrautdichte zwischen 10.000 und 1.000.000 Pflanzen pro Hektar variiert die auszubringende Pflanzenölmenge dementsprechend stark im Bereich von 0,3 bis 100 l Öl pro Hektar (Abb. 43). Bei einem Preis von 1,50 € je Liter fallen somit Kosten zwischen 45 Cent und 150 € pro Hektar für Pflanzenöl an. Diese enorme Spanne zeigt wie schwierig es ist eine grobe Kostenabschätzung für das gesamte Heißölapplikationsverfahren vorzunehmen. Gleichzeitig verdeutlicht diese Abschätzung aber auch, dass durch eine gezielte und selektive Applikation sehr viel Pflanzenöl und somit auch Kosten eingespart werden können.

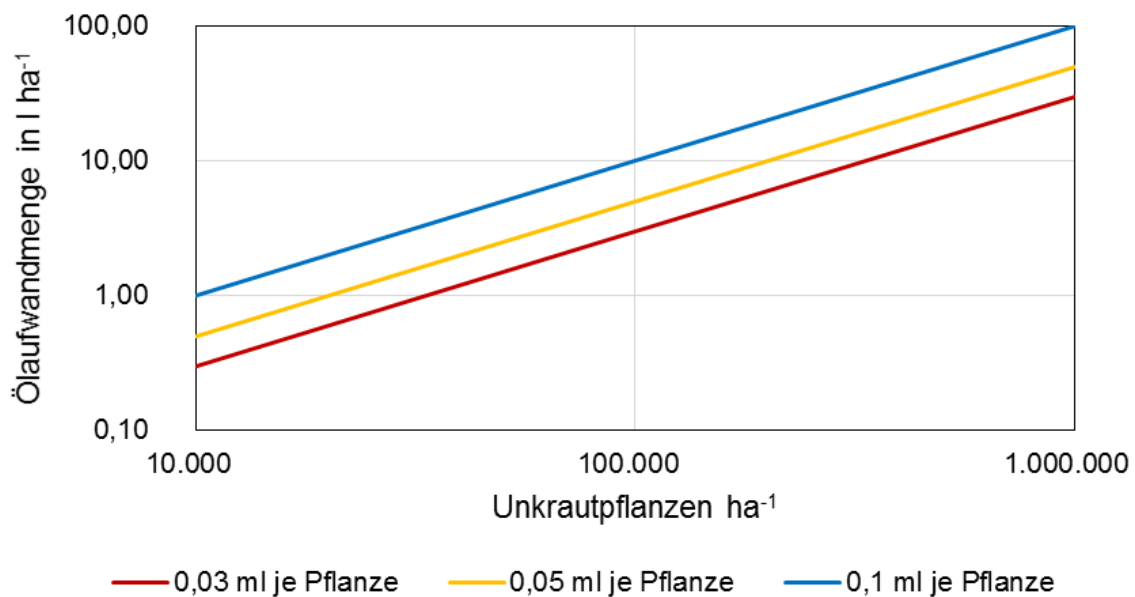


Abb. 43: Ölaufwandmenge in Abhängigkeit der Unkrautdichte

Ergänzend zum ökonomischen Einfluss der Ölaufwandmenge konnte über ein digitales Strommessgerät der Energieverbrauch in Kilowattstunde für das Erwärmen von 1 Liter Pflanzenöl um 180 K (20 auf 200 °C) bestimmt werden. Unter Laborbedingungen lag der Energieverbrauch bei  $0,371 \text{ kWh}^{-1}$  pro Liter.

Für eine grobe Abschätzung der Öl- und Energiekosten wurden in Tabelle 5 drei unterschiedliche Szenarien welche sich in Unkrautdichte und Ölaufwandmenge unterscheiden entwickelt. Das erste Szenario weist eine geringe Verunkrautung und eine niedrige Ölaufwandmenge auf. Szenario 2 stellt einen Mittelwert aus beiden Parametern dar. Das 3. Szenario zeigt die Kosten bei einer hohen Unkrautdichte und der maximalen Applikationsmenge auf. Die Fixkosten, bestehend aus Maschinen- und Personalkosten, werden nicht mit in die Kalkulation einbezogen.

Die Gesamtkosten (Öl- und Energiekosten) für das erste Szenario mit einer geringen Unkrautdichte von 10.000 Unkrautpflanzen je Hektar und einer Ölaufwandmenge von  $0,3 \text{ l ha}^{-1}$  betragen 48 Cent. Beim 2. Szenario steigen die Kosten bei einer um das 10-fache erhöhten Unkrautdichte und  $5 \text{ l Öl je Hektar}$  auf 8,06 €. Am teuersten ist das Aufheizen von  $100 \text{ l Öl}$  zur Bekämpfung von 1.000.000 Unkrautpflanzen je Hektar in Höhe von 161,13 €. Das Verhältnis von Ölkosten zu Energiekosten beträgt in diesen drei Beispielszenarien jeweils ca. 13:1. Aus ökonomischer Sicht ist daher das Aufheizen auf höhere Temperaturen für eine Heißölapplikation unter Laborbedingungen sinnvoller als eine Steigerung der Pflanzenölmenge auf einem niedrigeren Temperaturniveau. Idealerweise kann durch eine höhere

Flüssigkeitstemperatur die Aufwandmenge sogar reduziert werden was sich positiv auf den Abbau im Oberboden auswirken würde.

Tab. 5: Kostenkalkulation für Energie und Pflanzenöl bei unterschiedlichen Bekämpfungsszenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Unkrautdichte [Pflanzen m <sup>-1</sup> ]	10.000	100.000	1.000.000
Ölaufwandmenge [l ha <sup>-1</sup> ]	0,3	5	100
Ölpreis [€ l <sup>-1</sup> ]	1,50	1,50	1,50
Energieinput ( $\Delta T = 180 \text{ K}$ ) [kWh <sup>-1</sup> ]	0,11	1,86	37,10
Energiekosten [€ kWh <sup>-1</sup> ]	0,3	0,3	0,3
Kosten [€ ha <sup>-1</sup> ]	0,48	8,06	161,13

### 3.7 Abbauverhalten von Pflanzenölen im Oberboden

Die Zugabe von Pflanzenöl auf aufbereitete Bodenproben zeigte beim Vermischen in Plastikvesseln bei allen Böden umgehend eine deutlich sichtbare Strukturveränderung. In Abbildung 44 werden zwei verschiedene Ackerböden nach der Applikation von 0,1, 1 und 3 ml Rapsöl je 35 g Boden visuell miteinander verglichen. Dabei sollen die Varianten mit 1 und 3 ml Öl je 35 g Boden eine deutlich überhöhte Applikationsmenge im Vergleich zum praktischen Einsatz darstellen und so die Auswirkungen auf den Boden bei einer deutlichen Überschreitung der Ausbringmenge zeigen. In den durchgeführten Unkrautbekämpfungsversuchen wurden bislang 0,1 ml Öl pro Unkrautpflanze als absolut letal wirkende Höchstmenge bestimmt. Ab einer Aufwandmenge von 1 ml Rapsöl (c) kommt es sowohl bei Boden 1 als auch bei Boden 2 zu einer Verklumpung der Bodenteilchen welche jedoch bei Boden 2 deutlich sichtbarer ausfällt. Bei einer Ölaufwandmenge von 3 ml (d) formen sich die Bodenteilchen unter Einwirkung des Vortex-Schüttlers zu großen kompakten Kugeln, sodass nach kurzer Zeit kein Feinbodenmaterial mehr ungebunden im Plastikvessel vorhanden ist. Bei einer angenommenen Verunkrautung von 1.000.000 Unkräutern pro Hektar würde dies jedoch einer Ölaufwandmenge von 3.000 l ha<sup>-1</sup> entsprechen was ein extrem hoher und nicht praxisrelevanter Wert wäre.

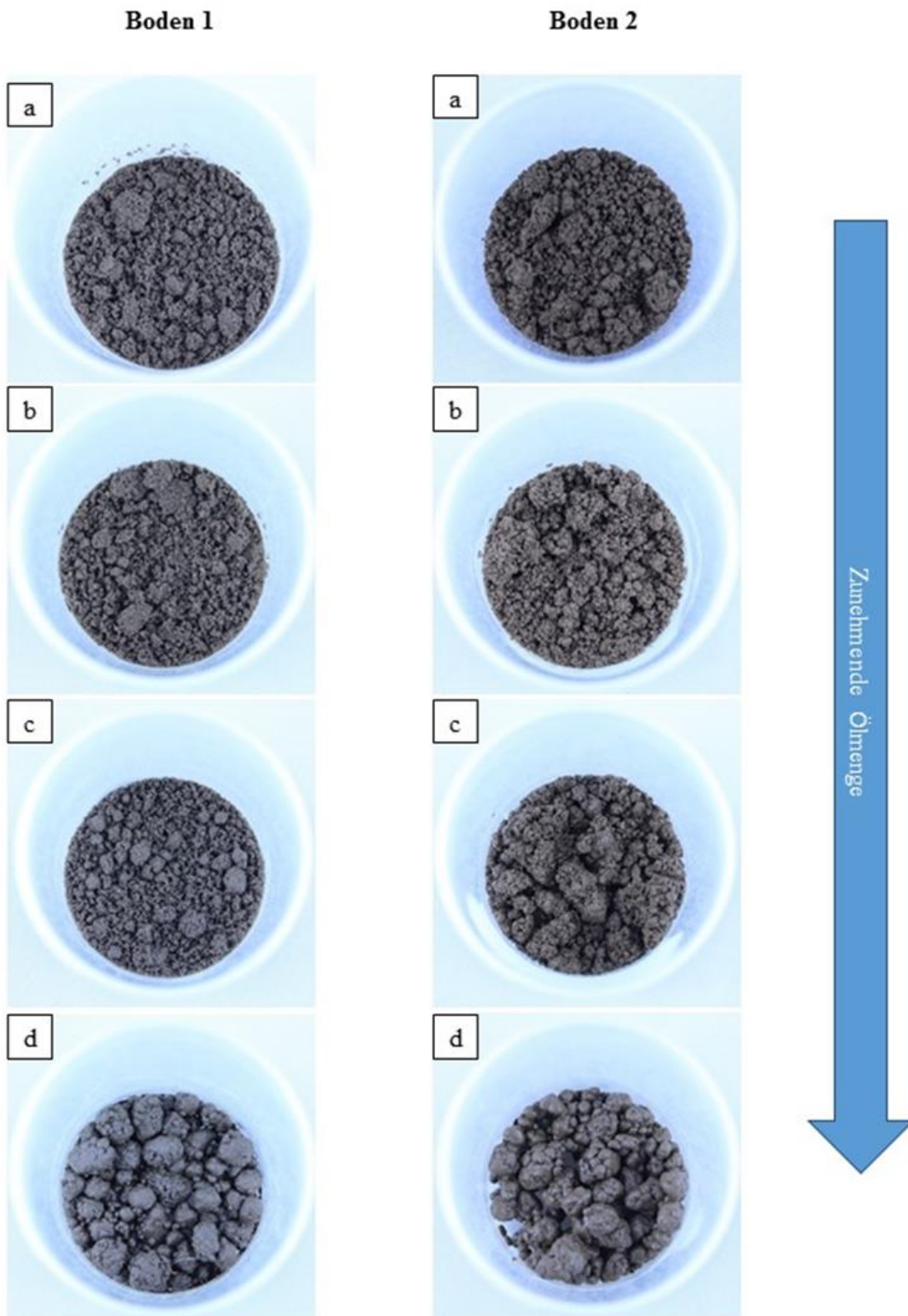


Abbildung 44: Vergleich der unterschiedlichen Ölmengen nach Einmischung in zwei Böden (a = ohne, b = wenig, c = mittel, d = viel Öl)

Die Analyse der Bodenproben im Respirometer bestätigte bei allen Versuchsvarianten einen eindeutigen Pflanzenölabbau im Ackerboden. Einen wesentlichen Einfluss hat dabei unter anderem der verwendete Boden. Der höchste relative Ölabbau innerhalb des 6-wöchigen Untersuchungszeitraumes betrug bei einer Flüssigkeitstemperatur von 22 °C 46,47 % (Boden 2, Variante 1). Bei einer Aufwandmenge von 3 ml (Variante 3) und Boden 2 konnte dagegen nur 8,56 % des ausgebrachten Öls vollständig abgebaut werden.

Eine Steigerung der Flüssigkeitstemperatur auf 100 °C (Varianten 4 – 6) zeigte dagegen im Mittel nur einen unwesentlich veränderten relativen Ölabbau im Vergleich zur 22 °C Variante (Varianten 1 – 3). Die Mediumstemperatur hat somit nur einen geringen Effekt auf das Abbauverhalten im Oberboden. Deutlich stärker ist dagegen der Einfluss der Ölaufwandmenge zu bewerten. Mit zunehmender Pflanzenölmenge je 35 g Boden nimmt der relative Ölabbau im Mittel aller drei Bodenarten von 39,73 über 21,40 auf 9,63 % ab ( $\bar{X}$ , Varianten 1 - 3) beziehungsweise von 35,75 über 20,04 auf 10,04 % ( $\bar{X}$ , Varianten 4 - 6) ab.

Tab. 6: Relativer, prozentualer Pflanzenölabbau bei drei unterschiedlichen Ackerböden (6-wöchiger Untersuchungszeitraum)

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Boden 1	34,89	23,37	11,12	24,08	20,88	11,37
Boden 2	46,47	19,99	8,56	48,37	21,95	9,85
Boden 3	37,85	20,86	9,22	34,81	17,30	8,90
$\bar{x}$	39,73	21,40	9,63	35,75	20,04	10,04

Varianten 1 – 3: bei 22 °C und 0,1, 1 und 3 ml Ölaufwandmenge

Varianten 4 – 6: bei 100 °C und 0,1, 1 und 3 ml Ölaufwandmenge

Die Zugabe von Nährstoffen zeigte in den Varianten 7 und 8 einen deutlich gesteigerten relativen Ölabbau. Annähernd 64,7 % des Pflanzenöls konnte bei Boden 2 (Variante 7) und einer Aufwandmenge von 0,1 ml je 35 g Boden abgebaut werden. Dabei zog eine Steigerung der Ölausbringmenge auf 1,0 ml (Variante 8) in dieser Versuchsreihe ebenfalls eine Verringerung des relativen Ölabbaus auf 36,21 % (Boden 1) nach sich. Unter Zugabe von Nährstoffen konnte der relative Ölabbau bei einer mittleren Ausbringmenge ( $\bar{X}$  = 21,40 %, Variante 8) im Vergleich zum Mittelwert ( $\bar{X}$  = 39,06 %) der Variante 2 nahezu verdoppelt werden.



Tab. 7: Relativer, prozentualer Pflanzenölabbau bei drei unterschiedlichen Ackerböden unter Zugabe von Nährstoffen (6-wöchiger Untersuchungszeitraum)

	Variante 7	Variante 8
Boden 1	44,80	36,21
Boden 2	64,67	42,43
Boden 3	43,35	41,06
$\bar{x}$	50,94	39,06

Variante 7: bei 22 °C; 0,1 ml Öl; 210 mg Nährstoff

Variante 8: bei 22 °C; 1,0 ml Öl; 210 mg Nährstoff

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass ein hoher relativer Ölabbau im Boden innerhalb weniger Wochen durch eine geringe Ölaufwandmengen begünstigt wird. Ebenfalls hat die Bodenart in den meisten Fällen einen bedeutenden Einfluss auf das Abbauverhalten. Die prozentualen Schwankungen zwischen den drei untersuchten Böden nahmen bei gleichen Versuchsparametern mit zunehmender Ölaufwandmenge ab. Das bedeutet, je größer die ausgebrachte Ölmenge ist, desto geringer ist der Einfluss des Bodens auf das Abbauverhalten.

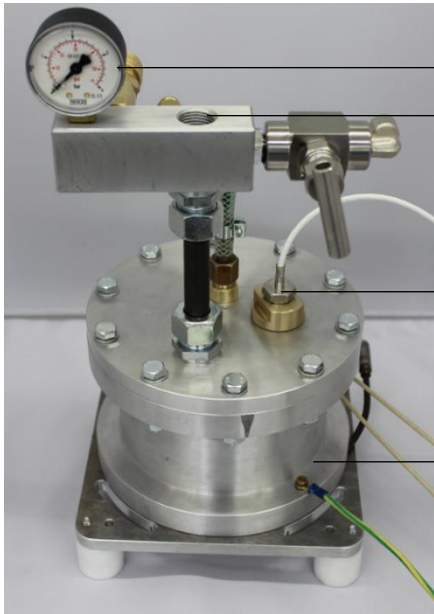
### 3.8 Optimierung der Laborversuchseinrichtung für eine gepulste Vollstrahlapplikation

Während der Laborversuche zur tropfenweisen Unkrautbekämpfung mit heißen Ölen und der anschließenden Datenauswertung zeigten sich die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens sehr deutlich. Es stellte sich heraus, dass die bisherige Applikationseinrichtung hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und der Ausbringung von Pflanzenölen über eine größere Distanz an ihre Grenzen stößt. Ferner war es nicht möglich einen schrägen oder gepulsten Voll-, Flach- oder Vollkegelstrahl in einer Vorwärtsbewegung exakt auf eine Zieloberfläche zu applizieren.

Die Summe der Kritikpunkte führte schließlich zu einem optimierten Laborapplikationsstand der hinsichtlich der Einstell- und Untersuchungsmöglichkeiten dem Vorgängermodell deutlich überlegen ist. Alle Bauteile des neuen Versuchsstandes wurden deutlich leistungsfähiger ausgelegt um alle im praktischen Einsatz aufkommenden Anforderungen erfüllen zu können.

Auf die Verwendung einer Förderpumpe wurde bewusst verzichtet da diese mit bis zu 250 °C heißem Pflanzenöl in Kontakt tritt und es in Folge dessen zu Undichtigkeiten durch unterschiedliche Materialausdehnungen im Pumpengehäuse kommen könnte.

Kernpunkt dieser Neuentwicklung ist der zentrale Aluminiumdrucktank (Abb. 45) mit einem in den Behälterboden integrierten und regelbaren 1500 W Flachheizstab. Dadurch können 1000 ml Pflanzenöl bis 250 °C effizient erwärmt werden. Ein doppelwandiges und gleichzeitig thermisch entkoppeltes Gehäuse schirmt den aufgeheizten Behälter vor der Umgebung ab und schützt vor Verbrennungen (Abb. 46 und 47).

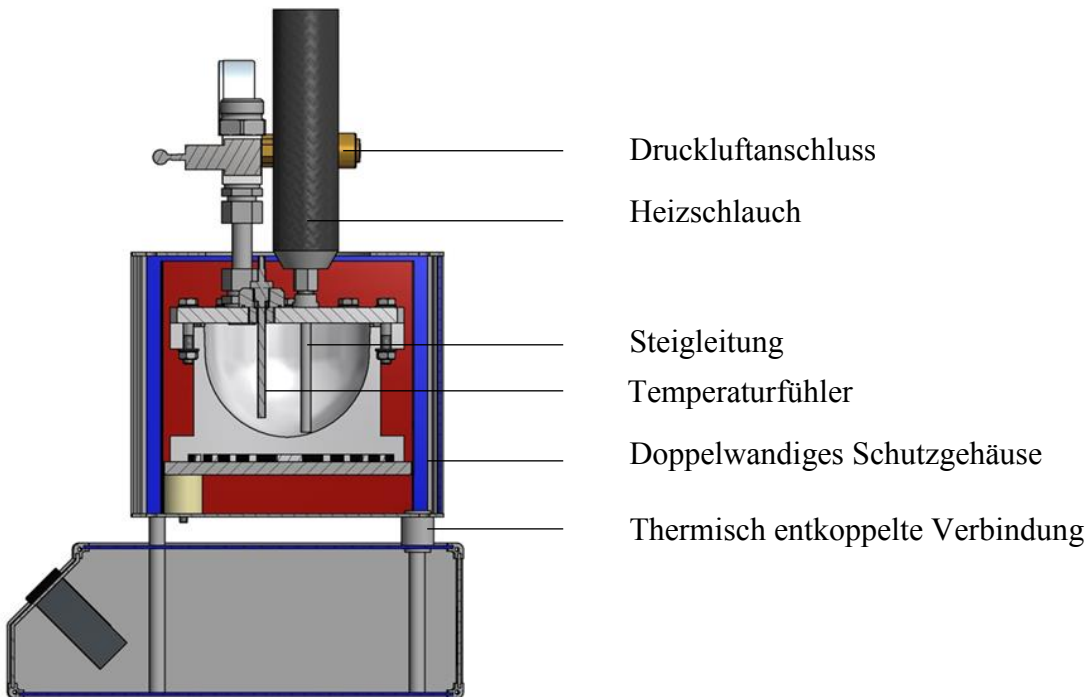


Manometer  
Einfüllöffnung

Temperaturfühler

Druckbehälter

Abb. 45: Aluminiumdruckbehälter mit Armaturen



Druckluftanschluss

Heizschlauch

Steigleitung

Temperaturfühler

Doppelwandiges Schutzgehäuse

Thermisch entkoppelte Verbindung

Abb. 46: Querschnitt der optimierten Laborapplikationseinrichtung

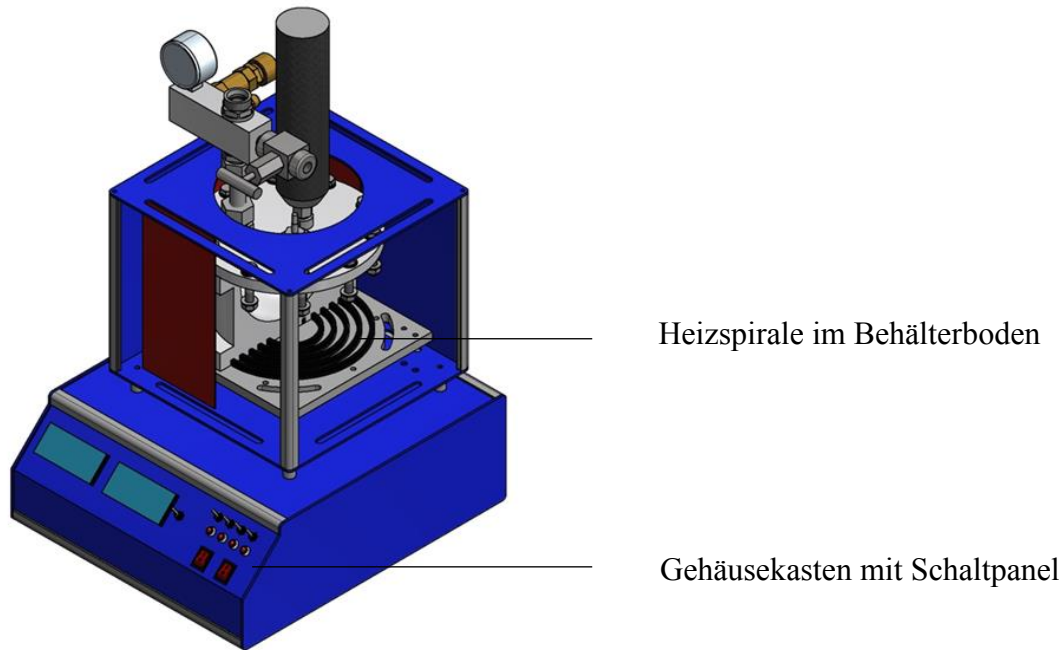


Abb. 47: 3D-Ansicht der optimierten Laborapplikationseinrichtung

Die Überwachung der Flüssigkeitstemperatur erfolgt über integrierte Messfühler. Der Behälterinnendruck wird über einen Tischkompressor und Regelventile gesteuert und beträgt aus Sicherheitsgründen maximal 4 bar. Um Temperaturverluste auf dem Weg vom beheizten Druckbehälter zur Applikationsdüse zu minimieren wurde ein elektrisch regelbarer 1/8" Heizdruckschlauch mit PTFE-Innenseele verbaut (Abb. 48).

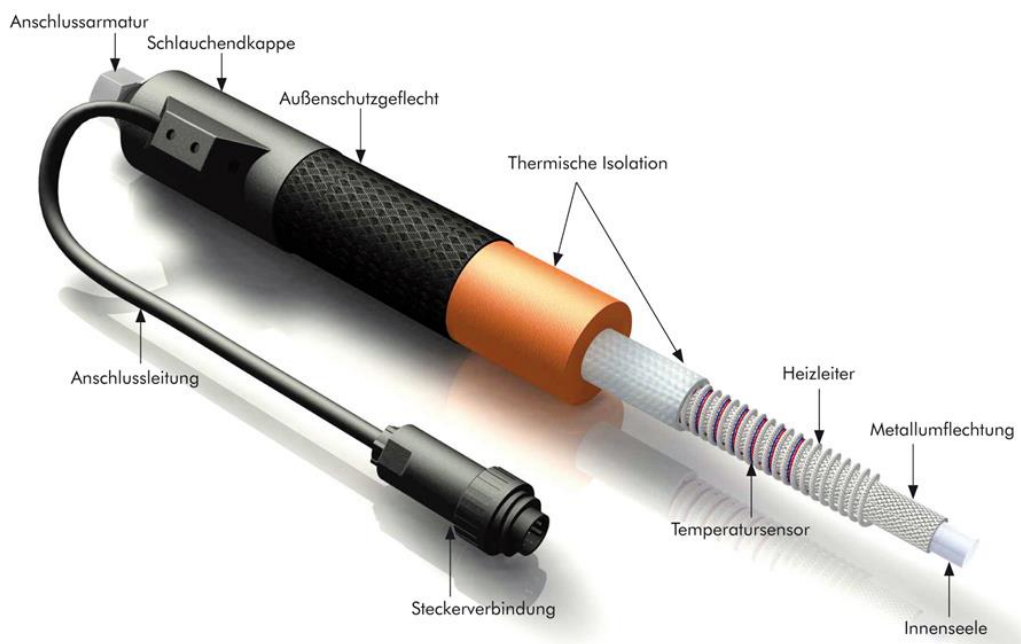


Abb. 48: Aufbau eines elektrisch geregelten Heizschlauchs mit PTFE-Innenseele (Hillesheim, 2017)

Über eine PKW-Einspritzdüse mit integriertem Schaltventil (Abb. 49) können sowohl gepulste Sprühstöße ( $< 0,1 \text{ ml}$ ) als auch ein einzelner, dauerhafter Vollstrahl ( $> 50 \text{ ml min}^{-1}$ ) mit konstantem Druck generiert werden. Das Totvolumen zwischen Schaltventil und Düsenloch ( $\text{Ø} = 0,25 \text{ mm}$ ) ist bei dieser Bauform minimal sodass es in Verbindung mit einer glatten Metalloberfläche rund um den Düsenaustrittsbereich zu keiner Nachtropfenbildung kommen kann. Die variable Ventilsteuerung erfolgt über ein elektrisches Schaltpanel. Austauschbare Filter verhindern unmittelbar vor dem Ventileingang das Verstopfen der Düse durch Fremdkörper und Schwebeteilchen. Alle Bauteile sind ausreichend druck- und temperaturstabil sodass ein gefahrloser Einsatz gewährleistet werden kann. Die Thermo- und Hochgeschwindigkeitskamera sowie der Ziellaser konnten aus dem vorherigen Laborapplikationsstand ohne weitere Änderungen übernommen werden. Die Bedienung aller Steuer- und Regelelemente wurde in der Front des Applikationsstandes zusammengefasst integriert.

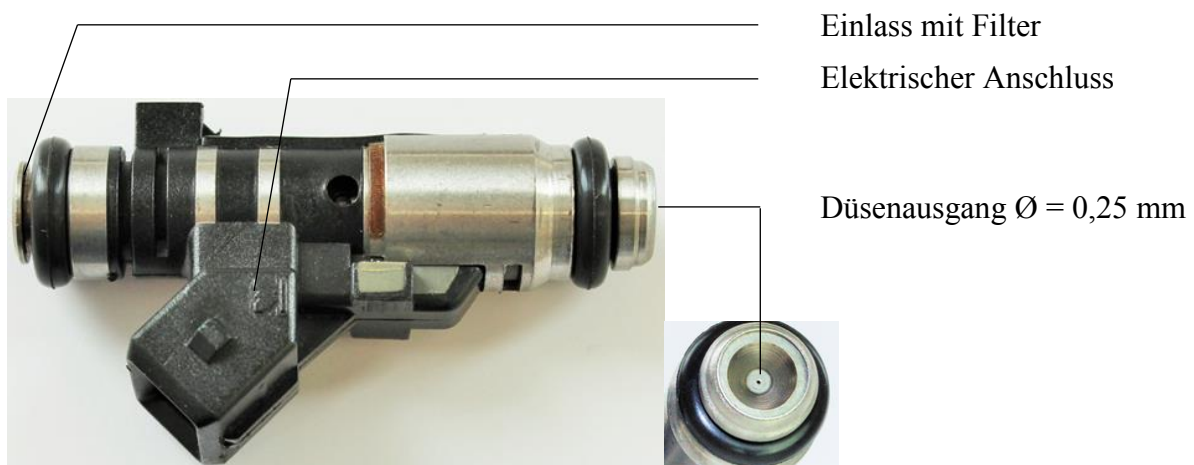


Abb. 49: Seitenansicht einer PKW-Einspritzdüse

### Erprobung der optimierten Applikationseinrichtung im Labor

Im Anschluss an den Bau und die technische Erprobung folgten weitere Unkrautbekämpfungsversuche im Labor (Abb. 50). Da bei der Applikation mit einem gepulsten Vollstrahl grundsätzlich von der gleichen Wirkweise wie bei einer tropfenweisen Applikation ausgegangen werden konnte, wurden die Unkrautbekämpfungsversuche in einem geringeren Umfang wie bei der vorherigen Untersuchung wiederholt. Es wurde jeweils ein monokotyles Unkraut (Quecke) und ein dikotyles Unkraut (Hirtentäschel) in allen Versuchsparametern überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass die generelle Wirkweise gegeben war und bei Dikotyledonen ähnlich gute Wirkungsgrade  $> 96 \%$  bei einer Aufwandmenge  $> 0,1 \text{ ml}$  und  $250 \text{ °C}$  erzielt werden konnten. Bei kleineren Aufwandmengen  $< 0,1 \text{ ml}$  und  $250 \text{ °C}$  sank der Bekämpfungserfolg unter  $30 \%$ . Dies liegt im Wesentlichen an den höheren Ölverlusten beim

druckvollen Aufprall auf das Wachstumszentrum. Es konnte beobachtet werden, dass größere Mengen an appliziertem Öl von der Pflanze abprallten und auf den Boden tropften. Diese Verluste müssen bei einer Spritzapplikation sowohl mit einem Vollstrahl als auch mit einem Flachstrahl systembedingt hingenommen und berücksichtigt werden.

Monokotyle Unkräuter ließen sich trotz eines Ziellasers schwieriger treffen. Das führte dazu, dass einige Stängel gar nicht oder nur geringfügig von heißem Öl benetzt wurden und die Spritzverluste deutlich größer ausfielen als bei Dikotyledonen. Wurde jedoch eine Queckenpflanze ganzflächig getroffen so wurden auch bei Aufwandmengen  $< 0,1$  ml und  $250\text{ °C}$  Wirkungsgrade  $> 96\%$  erreicht. Die Erhöhung der Aufwandmenge auf  $> 0,1$  ml brachte wiederum einen hundertprozentigen Bekämpfungserfolg.

Beim Aufprall des Strahls vor allem bei größeren, länglichen Pflanzen kam es jedoch zu einer erheblichen Wankbewegung. Diese Bewegungen müssen bei einer gezielten, selektiven Spritzapplikation eingeplant werden. Es ist daher ratsam die nötige Ölmenge möglichst in kurzer Zeit auf die Pflanzenoberfläche aufzubringen bevor die gesamte Pflanze anfängt sich durch die Ölanlagerung zu bewegen und ein erneutes Anvisieren unmöglich macht.



Abb. 50: Applikationsstand im praktischen Laboreinsatz

#### 4. Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojektes war eine Laborversuchseinrichtung zu entwickeln mit deren Hilfe Pflanzenöle auf Temperaturen  $> 100\text{ °C}$  erhitzt werden können um diese anschließend exakt dosiert und möglichst präzise auf Unkräuter zu applizieren. Auf Grund einer umfangreichen Literaturstudie und gezielten Laboruntersuchungen wurden Raps- und Sonnenblumenöl als besonders geeignet befunden. Es konnten sowohl technische als auch pflanzliche Einflussparameter herausgefunden und untersucht werden die einen wesentlichen Einfluss auf einen positiven Bekämpfungserfolg haben. Die im Vergleich zu Wasser um ca. 50 % niedrigere Wärmekapazität von Raps- und Sonnenblumenöl ermöglicht ein schnelles und effizientes Aufheizen auf Temperaturen bis zu  $250\text{ °C}$ . Mit Hilfe selbstentwickelter Düsen konnte zunächst Pflanzenöl tropfenweise appliziert und das Abkühlverhalten im freien Fall sowie auf der Pflanzenoberfläche durch eine Wärmebildkamera untersucht werden. Eine große Distanz zwischen Applikationsdüse und Aufprallort führt zu einer schnellen Erniedrigung der Öltemperatur. Nach dem Aufprall des Tropfens wird die gespeicherte Wärmeenergie an die Pflanzenoberfläche übertragen und führt in Abhängigkeit der Flüssigkeitstemperatur (mindestens  $45\text{ °C}$ ) zu einer deutlichen Schädigung des Gewebes bis hin zum Absterben der gesamten Unkrautpflanze innerhalb weniger Tage. Zur Ermittlung der genauen Schadwirkung wurden umfangreiche Unkrautbekämpfungsversuche im Labor an ausgewählten Ackerunkräutern durchgeführt. Die Unkräuter wurden zuvor in einem Gewächshaus ausgesät, pikiert und bis zum gewünschten Wachstumsstadium herangezogen. Ab einer Ölausgangstemperatur  $> 150\text{ °C}$  und einer Fallhöhe von 15 cm konnte eine deutliche Unkrautschädigung beobachtet werden. Mit steigender Öltemperatur und/oder Aufwandmenge ( $> 0,03\text{ ml}$  je Unkrautpflanze) konnte ein positiver Einfluss auf den Bekämpfungserfolg festgestellt werden. Junge Unkrautpflanzen ließen sich mit einem geringeren Energieeinsatz bekämpfen als ältere. Der optimale Ort für eine Heißölapplikation befindet sich bei Dikotyledonen im Bereich des Wachstumszentrums und bei Monokotyledonen oberhalb des Wurzelhalses.

Mit dem Bau einer effizienteren und leistungsfähigeren Applikationseinrichtung zur Unkrautbekämpfung mit einem gepulsten Vollstrahl konnte ein weiteres Projektziel erreicht werden. Dieser Versuchsstand ermöglicht ein schnelleres und druckvolleres Benetzen der Unkräuter auch bei schrägen Spritzwinkeln. Durch eine leistungsstarke Wärmeisolierung und die Nutzung eines zusätzlichen Heizschlauches konnten die Wärmeverluste bis zur Applikationsdüse deutlich gesenkt werden. Über eine elektrisch geregelte Einspritzdüse kann die Flüssigkeitsmenge präzise, zeit- und mengengesteuert werden. Die Applikation eines gepulsten Vollstrahls auf schmale beziehungsweise runde Pflanzenoberflächen führte insgesamt durch Abtropfverluste zu einer erhöhten Ölaufwandmenge.

In einer Kooperationsuntersuchung zusammen mit dem Institut für Bodenkunde der Universität Bonn wurden die ökologischen Auswirkungen durch die Ausbringung von Pflanzenölen auf den Oberboden untersucht. Auf Grund eines raschen Pflanzenölabbaus durch Mikroorganismen konnten keine negativen Einflüsse auf den Ackerboden festgestellt werden.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit deuten darauf hin, dass die Heißölapplikationstechnik eine Alternative zu den bisherigen, etablierten, thermischen Unkrautbekämpfungsverfahren darstellen kann. Für detailliertere Aussagen zur Effizienz und Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen speziell auch unter praxisnahen Freilandbedingungen.

### **5. Schlussfolgerung für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis**

Die Untersuchung eines alternativen, thermischen Unkrautbekämpfungsverfahrens hat gezeigt, dass die Heißölapplikation großes Potential hat um Unkräuter in Reihenkulturen selektiv zu bekämpfen. Aufbauend auf dieser Untersuchung sind weitere Forschungsaktivitäten hinsichtlich eines praxisnahen Feldeinsatzes von Interesse. Hierfür ist ein Umbau zu einem feldtauglichen Versuchsträger mit einer autarken Stromversorgung mittels Generator notwendig. Alle Baukomponenten müssen für den Außeneinsatz robust und wetterfest sein. Die Erhöhung des Ölvorrates auf ein Volumen zwischen 5 und 20 l ist empfehlenswert damit auch größere Aufwandmengen ohne Unterbrechungen ausgebracht werden können. Dabei ist das Erhitzen eines großvolumigen Ölbehälters auf Temperaturen  $> 150\text{ °C}$  aus energetischer Sicht nicht sinnvoll. Hierfür würde sich eine stufenweise Erwärmung in mehreren kleineren Behältern oder das Aufheizen im Durchfluss unmittelbar an der Düse mit Hilfe beheizter Kapillaren anbieten.

Ein weiteres wesentliches Arbeitspaket stellt die Erkennung von Ackerunkräutern dar. Nur mit einem leistungsfähigen Unkrautererkennungssystem kombiniert mit einer präzisen Düsensteuerung ist eine zielgenaue, selektive Applikation in das Wachstumszentrum von Dikotyledonen im feldnahen Einsatz realisierbar. Mit einem vergleichsweise geringen Kosteneinsatz für Pflanzenöl und Energie ist dann aber auch eine effiziente Unkrautbekämpfung sowohl in hochwertigen Reihenkulturen als auch im ökologischen Landbau denkbar. Der Einsatz dieser Technik sollte jedoch in einem möglichst frühen Wachstumsstadium der Unkräuter beginnen um die Ölaufwandmengen und den damit verbundenen Eintrag in Ackerböden möglichst gering zu halten und die Effizienz des Gesamtverfahrens zu steigern. Es ist jedoch auch davon auszugehen, dass eine einmalige Behandlung nicht ausreicht um den Unkrautdruck über die gesamte Vegetationsperiode der Kulturpflanze nachhaltig zu regulieren. Ein mehrmaliges Überfahren desselben Ackers wird nötig sein um ein optimales Wachstum der Kulturpflanze gewährleisten zu können. Die

Kombination einer thermischen Unkrautbekämpfung für den intra-row Bereich und einer mechanischen Regulierung des inter-row Bereiches durch Striegel- oder Hackwerkzeuge kann in einem gemeinsamen Arbeitsgang die Effizienz des Verfahrens weiter steigern und die Kosten senken.

Im Falle von Herbizidresistenzen oder dem Verbot von herbiziden Wirkstoffen kann die thermische Unkrautbekämpfung mit heißen Ölen auf Grund der physikalischen Wirkweise zukünftig eine dauerhafte und umweltverträgliche Alternative zu chemischen Pflanzenschutzverfahren darstellen.



## 6. Kurzfassung

Der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft wird zunehmend gesellschaftspolitisch kritisiert. Forderungen werden laut, die Ausbringung bestimmter Herbizide gänzlich zu verbieten.

Das Institut für Landtechnik der Universität Bonn beschäftigt sich daher seit Jahren intensiv mit der Suche nach einem alternativen, effizienten und selektiv wirksamen Verfahren Unkräuter in Reihenkulturen sowohl inter-row als auch intra-row bekämpfen zu können. Hierbei rückten Pflanzenöle aus nachwachsenden Rohstoffen in den Fokus, die auf hohe Temperaturen erhitzt und mittels Sprühapplikation gezielt auf Unkräuter appliziert werden sollen.

Der Ansatz dieses Forschungsprojektes beruht auf den thermophysikalischen und fluidmechanischen Eigenschaften von pflanzlichen Ölen, die im Vergleich zu Wasser wesentlich schneller und auf deutlich höhere Temperaturen ( $> 100\text{ °C}$ ) erwärmt werden können sowie auf der guten Anhaftung an Pflanzenoberflächen. Durch die Nutzung dieser thermophysikalischen Eigenschaften wird eine ausreichende Schädigung des pflanzlichen Gewebes durch Eiweißdenaturierung erwartet, was zum Absterben des Unkrautes oder zu einer Wachstumsverzögerung führen soll.

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen heißen Pflanzenölen und Unkräutern wurden am Institut für Landtechnik Unkrautbekämpfungsversuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass Sonnenblumen- und Rapsöl schnell und effizient auf bis zu  $250\text{ °C}$  erwärmt werden können und daher besonders für eine Heißölapplikation geeignet sind. Mit Hilfe von Anzuchtschalen wurden 2 monokotyle und 4 dikotyle Unkrautarten im Gewächshaus kultiviert und anschließend mit heißem Pflanzenöl bekämpft. Hierbei wurde die Aufwandmenge zwischen 0,03 und 0,1 ml je Unkrautpflanze variiert und die Öltemperatur beginnend bei  $250\text{ °C}$  stufenweise auf  $150\text{ °C}$  abgesenkt. Nachweislich führt sowohl eine hohe Flüssigkeitstemperatur als auch eine hohe Aufwandmenge zu einer letalen Unkrautschädigung mit einem Gesamtwirkungsgrad von 93 %.

Durch die Zusammenarbeit mit dem Institut für Bodenwissenschaften der Universität Bonn war es möglich auch das Abbauverhalten von ausgebrachten, heißem Pflanzenöl im Oberboden zu untersuchen. Dabei konnte ein rascher Ölabbau innerhalb weniger Wochen nachgewiesen werden.

Insgesamt haben die Forschungsergebnisse gezeigt, dass die thermische Heißölapplikation eine effiziente und nachhaltige Alternative zu den bereits bestehenden Pflanzenschutzverfahren sein kann und einen Beitrag zur Reduzierung des chemischen Pflanzenschutzmitteleinsatzes in der

landwirtschaftlichen Produktion leisten kann. Darüber hinaus ist mit dieser umweltfreundlichen Technik auch ein Einsatz im ökologischen Landbau denkbar.

## **7. Abstract**

The use of chemical pesticides in agriculture is increasingly criticized socio-politically. Demands are made to prohibit the application of certain herbicides altogether.

For years, the Institute of Agricultural Engineering of the University of Bonn has been working intensively in search of an alternative, efficient and selectively effective method to control weeds in row crops both inter-row and intra-row. On this occasion, the focus was on vegetable oils made from renewable raw materials, which are heated to high temperatures and applied by spray application onto weeds.

The approach of this research project is based on the thermophysical and fluid mechanical properties of vegetable oils, which can be heated much faster and to higher temperatures ( $> 100\text{ °C}$ ) compared to water and on the good adhesion to plant surfaces. Through the use of these thermophysical properties sufficient damage to the plant tissue is expected by protein denaturation, which should lead to the death of the weeds or to a growth retardation.

To investigate the interactions between hot vegetable oils and weeds, scientific experiments on weed control were conducted under laboratory conditions at the Institute of Agricultural Engineering. It turned out that sunflower and rapeseed oil can be heated quickly and efficiently up to  $250\text{ °C}$ . Therefore these liquids are particularly suitable for hot oil application. With the help of seed trays, 2 monocots and 4 dicotyledonous weed species were cultivated in the greenhouse and subsequently treated with hot vegetable oil. In this case, the application rate was varied between 0.03 and 0.1 ml per weed plant. The oil temperature was even gradually lowered starting at  $250\text{ °C}$  up to  $150\text{ °C}$ . Both, a high liquid temperature and a high application rate lead demonstrably to lethal weed damages with an overall efficiency of 93%.

Through the cooperation with the Institute of Soil Sciences of the University of Bonn it was possible to investigate the degradation behavior of applied, hot vegetable oil in the topsoil. In this case, a rapid oil degradation could be detected within a few weeks.

In total, the research results have shown that the hot oil application system can be an efficient and sustainable alternative to the existing plant protection methods. Furthermore it can contribute to the reduction of chemical pesticide use in agricultural production. In addition, the use of this environmentally friendly technology is also in organic farming conceivable.

## 8. Literaturverzeichnis

ABBOTT, W.S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18: 265-267.

ASCARD, J., HATCHER, P.E., MELANDER, B., UPADHYAYA, M.K. (2007). *Thermal Weed Control*. CAB International 2007.

ASTATKIE, T., RIFAI, M.N., HAVARD, P., ADSETT, J., LACKO-BARTOSOVA, M., OTEPKA, P. (2007). Effectiveness of hot water, infrared and open flame thermal units for controlling weeds. *Biological Agriculture and Horticulture* 25 (1), 1-12.

ÅSTRAND, B. (2002). An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed-control. *Autonomous robots* 13, 21-35.

ÅSTRAND, B. (2005). *Vision based perception for mechatronic weed control*. Chalmers University of Technology: Department of Computer Sciences and Engineering, 107 pages.

BHATIA, V. K.; CHAUDHRY, A.; SIVASAVKARAN, 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

BERTRAM, A. (1996). *Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung*. Dissertation, TU München, Institut für Landtechnik (Freising-Weihenstephan).

BOND, W., TURNER, R. J. and GRUNDY, A. C. (2003). A review of non-chemical weed management, Report prepared as part of Defra project OF0315, 81.

DAAR, S. (1994). New technology harnesses hot water to kill weeds. *IPM Practitioner* 16, 1-5.

DANIELL, J.W., CHAPPELL, W.E. & COUCH, H.B. (1969). Effect of sublethal and lethal temperature on plant cells. *Plant Physiology* 44, 1684-1689.

DIERAUER, H. (2000): *Merkblatt Abflammen*. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), 1-4.

DILLON, C.R.; SHEARER, S.; FULTON, J.; PITLA, S. (2007): Improved profitability via enhanced resolution of variable rate application management in grain crop production. J.V. Stafford (Ed.): *Precision Agriculture 2007*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen.

DIVER, S. (2002): *Flame Weeding for Vegetable Crops*. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA), 1-16.

FRANKE, W., (1967). Mechanisms of Foliar Penetration of Solutions. *Annual Review of Plant Physiology* Vol. 18, S. 281-300.

- GERHARDS, R., OEBEL, H. (2006): Practical experiences with a system of site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. *Weed Research*, 46 (3), 185-193.
- GOANKAR, A. G. (1989). Interfacial Tensions of Vegetable Oil/Water systems: Effect of Oil Purification, *Journal of the American Oil Chemists* Vol. 66, S.1090-1092
- GRIEPENTROG, H. W. (2005). Weed Control by Autonomous Vehicle Systems. In: *Workshop Proceedings Precision Farming - Sensing and Robotics*, Hohenheim University, 6-9.
- HANSSON, D., ASCARD J. (2002). Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control. *Weed Research* 42, 307-316.
- HANSSON, D., MATTSSON, J.E. (2003). Effect of air temperature, rain and drought on hot water weed control. *Weed Research* 43, 245-251.
- HOFFMANN, M. (1989). *Abflammtchnik*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 4. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- HUBER, B., KLEISINGER, S. (2006). Umweltgerechte thermische Unkraut- und Vegetationsregulierung. Abschlussbericht, BMBF Förderkennzeichen 0330120A.
- IMMINK, H. (2010). Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration. Dissertation Bonn, 4-5.
- KIRKWOOD, R. (1993). Use and Mode of Action of Adjuvants for Herbicides: A Review of some Current Work. *Pesticide Science* Vol. 38, 93-102.
- KLAABEN, H., Freitag, J. (2004). *Ackerunkräuter und Ackerungräser - rechtzeitig erkennen*. Landwirtschaftsverlag, Münster.
- LEON, R.G., FERREIRA, D.T. (2008). Interspecific differences in weed susceptibility to steam injury. *Weed Technology* 22 (4), 719-723.
- LEVITT, J. (1980). *Responses of Plants to Environmental Stresses*, 2<sup>nd</sup> edn, Vol. 1. Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses. Academic Press, New York, USA.
- MARMUR, A. (2005). Soft contact: measurement and interpretation of contact angles. *Soft Matter* Vol. 2, 12-17.
- MERFIELD, C. (2000). *Organic Weed Management: A Practical Guide*. Available at [www.merfield.com/research/2003/organic-weed-management-2003-merfield.pdf](http://www.merfield.com/research/2003/organic-weed-management-2003-merfield.pdf) (accessed November 28, 2014. P. 22)

RAFFAELLI, M., FRONTANELLI, M., FRASCONI, C., SORELLI, F., GINANNI, M., PERUZZI, A. (2011). Physical weed control in processing tomatoes in Central Italy. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 26 (2), 95-103.

RASMUSSEN, J., BIBBY, B. M., SCHOU, A. P. (2008): Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods, *Weed Research*, 48, 523-532.

VARGAFTIK, N. B., VOLKOV, B. N., VOLJAK, L. D. (1983): International Tables of the Surface Tension of Water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 12, 817.

## **9. Anhang**

### **9.1 Mitteilung über evtl. schützenswerte Nutzungsrechte**

Schützenswerte Nutzungsrechte sind im Zusammenhang mit dieser Forschungsarbeit nicht entstanden.

### **9.2 Liste über Veröffentlichungen**

Development of an application system for selective, thermal weed control in row crops with vegetable oil (2017). (LANDTECHNIK Agricultural Engineering)

### **9.3 Liste über Vorträge**

Im Rahmen des Projektes konnten keine Vorträge gehalten werden

### **9.4 Liste über Pressemitteilungen**

<http://www.liz-online.de/meldungen/meldung/datum/2017/06/29/innovative-unkrautbekaempfung-1.html> Agritechnica und Uni Bonn?

<https://www.ko-ga.eu/deutsch/projekte/mechanisierung-von-prozessen/#M01>

<https://www.uni-bonn.de/neues/pflanzenoel-statt-herbizide>

### **9.5 Liste über Posterpräsentationen, Vorführungen und Demonstrationen**

4th CIGR International – AgEng Conference 2016 – Robotics, Environment and Food Safety (Aarhus, Dänemark)

Agritechnica 2017 Hannover, Poster mit Anschauungsmodell der Heißölapplikation