

Forschungsbericht

Nr. 195

Selbsttrocknende Öle auf Basis Nachwachsender
Rohstoffe zum Schutz von Pflanzen gegenüber
abiotischen und biotischen Schadfaktoren.

(Self-Drying plant oils from renewable resources to protect crops
against abiotic and biotic stress)

Verfasser:

Thorsten Kraska, Ralf Pude

**Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz –
Nachwachsende Rohstoffe**

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

Meckenheimer Allee 172, 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, April 2021

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. Ralf Pude, Dr. Thorsten Kraska

Projektbearbeiter: Prof. Dr. Ralf Pude, Dr. Thorsten Kraska, Vera Breiing, Michael Petry (PETRYmade)

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz
Nachwachsende Rohstoffe
Klein-Altendorf 2
53359 Rheinbach

Kooperation: Michael Petry, PETRYmade, Meckenheim;
Dr. Ulrike Steiner, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften
und Ressourcenschutz, Universität Bonn

Zitiervorschlag:

Kraska, T., Breiing, V., Pude, R. (2021): Selbsttrocknende Öle auf Basis Nachwachsender Rohstoffe zum Schutz von Pflanzen gegenüber abiotischen und biotischen Schadfaktoren. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 195, 50 Seiten

Einleitung	- 5 -
Material und Methoden	- 8 -
Ergebnisse.....	- 10 -
Wirkung auf die Pflanzen.....	- 10 -
Fungizide Wirkung am Model Buschbohne.....	- 20 -
Fungizide Wirkung gegenüber Apfelschorf.....	- 30 -
Fungizide Wirkung gegenüber <i>Phytophthora infestans</i>	- 31 -
Insektizide Wirkung gegenüber der Schwarzen Bohnenlaus (<i>Aphis fabae</i>).....	- 38 -
Insektizide Wirkung gegenüber dem Kartoffelkäfer (<i>Leptinotarsa decemlineata</i>)	- 40 -
Diskussion	- 43 -
Literatur	- 45 -
Liste der Veröffentlichungen und Präsentationen.....	- 48 -
Kurzfassung.....	- 49 -
Executive Summary	- 50 -

Einleitung

Die Suche nach neuen, umweltschonenden Verfahren zum Schutz und Stärkung von Kulturpflanzen vor abiotischen und biotischen Schadfaktoren muss ein zentrales Ziel vor allem auch im ökologischen Anbau sein, um Nahrungsmittel höchster Qualität produzieren zu können. Die dabei verwendeten Verfahren dürfen Nützlinge nicht schädigen, keine Rückstände produzieren und müssen im Agrarökosystem biologisch abbaubar sein.

Bereits in den 1940er Jahren stellten Clayton et al. (1943) fest, dass bestimmte pflanzliche Öle einen Blauschimmelbefall (*Peronospora tabacina*) bei Tabak reduzieren konnten und vermuteten, dass die Fettsäurezusammensetzung für die fungizide Wirkung wichtig ist. So hatten Öle mit einem hohen Linolensäuregehalt (z.B. im Leinöl) oder α -Eleostearinsäure (z.B. im Tungöl) eine bessere Wirkung als andere Pflanzenöle mit einem nur geringen Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (z.B. Rapsöl). Neben einer Wirksamkeit gegen pilzliche Schaderreger ist für Lein- und Tungöl auch eine Wirkung auf Insekten, wie der Weißen Rosenschildlaus (Brendel, 2013) oder dem Baumwollkapselkäfer (Jacobsen et al., 1981), belegt. Trotz der bereits gezeigten Erfolge in der Bekämpfung von pilzlichen Schaderregern und Schädlingen mit selbsttrocknenden Ölen blieben eine systematische Untersuchung der Wirksamkeit dieser Pflanzenöle und deren Wirkmechanismen aus. Pflanzenöle (z.B. Rapsöl) werden heute zwar im Pflanzenschutz oder zur Pflanzenstärkung eingesetzt, sind aber in ihrer Bedeutung – im Gegensatz zu ätherischen Ölen - noch nicht eingehend systematisch erforscht und das Potenzial von Pflanzenölen mit ihrem charakteristischen Fettsäuremuster und den sich daraus Eigenschaften ungenutzt. Dabei böten gerade Pflanzenöle aufgrund ihrer sehr geringen bzw. fehlende Ökotoxizität und guten Abbaubarkeit große Vorteile im ökologischen Anbau. Insbesondere fehlen Studien zur Wirksamkeit von Pflanzenölen mit einem erhöhten Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren, welche oxidativ trocknen und Filme auf Oberflächen bilden.

Pflanzenöle mit einem hohen Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren, wie Lein- oder Tungöl, zeichnen sich durch ihre oxidative Trocknung an der Luft¹ aus (Roth und Lormann,

¹ Im Folgenden werden diese Pflanzenöle als „trocknend“ bezeichnet. Der Begriff „selbsttrocknend“ wird in diesem Projektbericht nicht mehr verwendet, weil er missverständlich sein könnte, da alle Öle auch von selbst trocknen. Zudem wird in der Fachliteratur für oxidativ trocknende Öle die Kategorisierung „trocknend“ verwendet und wird über die Iodzahl definiert (siehe Firestone, 2013).

2005; Firestone, 2013), wodurch ein Film entsteht, der auf Oberflächen stabil haftet. Dieses Prinzip nutzt man seit langem in der Lack- und Kosmetikindustrie. Dieses Prinzip der Filmbildung nutzt man seit langem in der Lack- und Kosmetikindustrie (Derksen et al., 1995), in der Medizin als Wundabdeckung, als Trägermaterial für Wirkstoffe bzw in der Geweberegeneration (DeSouza et al., 2017; Lin et al., 2017) sowie als Biopolymere (Miao et al., 2014). Nach der Trocknung bleiben die Öle biologisch abbaubar, wobei die genauen Mechanismen noch nicht endgültig geklärt sind (Yang et al., 2015). Pflanzenölfilme werden zunehmend in der Medizin zur Wundabdeckung, als Trägermaterial in Medikamenten und in der Geweberegeneration eingesetzt. Dabei ist vor allem die sehr geringe Humantoxizität und die sehr gute biologische Abbaubarkeit von Vorteil (Lligadas et al., 2013). Von großem Vorteil sind zudem die vielfältigen Modifikations- und Kombinationsmöglichkeiten der Pflanzenöle. Hierzu zählen die unterschiedlichen Film- bzw. Trägermaterialien, die Entwicklung von Mikro- oder Hydrogelen (Miao et al., 2013) und die Mischbarkeit mit Wasser als Lösungsmittel (Alam et al., 2013).

Trotz der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten werden trocknende Pflanzenöle in der Landwirtschaft und im Gartenbau wenig genutzt. Dabei könnten die geringe Ökotoxizität, gute biologische Abbaubarkeit und die geringe Warmblütertoxizität von großem Vorteil bei der Entwicklung umweltschonender Pflanzenstärkungs- und Pflanzenschutzmittel sein.

Im ökologischen Landbau sind derzeit Produkte auf Basis von Rapsöl als Pflanzenschutzmittel zugelassen (BVL, 2015), obwohl auch die Wirksamkeit verschiedener anderer Pflanzenöle gegen den Echten Apfelmehltau (Gerlach, 1993) oder den Falschen Mehltau an Salat (Richter et al., 2010) gezeigt werden konnte. Für die Infektion ist die Pflanzenoberfläche von entscheidender Bedeutung, weil sie die primäre mechanische und physiologische Barriere darstellt. Die Bedeutung der Kutikula als Grenzfläche und für die Phyllospäre, sowie ihre Funktion als Transpirationsbarriere und ihre Rolle bei der Stoffaufnahme sind von Zeissler (2013) beschrieben. Der kutikuläre Anteil an der Gesamttranspiration liegt nach Bresinsky et al. (2008) für ausgewählte krautige Pflanzen zwischen 6 und 32 %. Petcu et al. (2009) zeigen, dass die kutikuläre Transpiration bei Trockenstress mit einem Ertragsverlust korreliert. Die Schutzfunktion vor übermäßigem Wasserverlust kann durch mechanische Verletzungen, Pilz- und Schädlingsbefall und Umweltstress (z.B. UV-Licht, Trockenheit) beeinträchtigt sein (Yeats und Rose, 2013). In einem ganzheitlichen Pflanzenschutz sollte daher dem Schutz der Kutikula als primärer

Angriffsort für Schädigungen besondere Bedeutung beigemessen werden.

Neben dem Schutz vor biotischen Schadfaktoren könnten selbsttrocknende Pflanzenölfilme auch als Träger für Pflanzenstärkungsmittel oder Substanzen dienen, welche die Pflanzen vor abiotischen Stressfaktoren, wie UV-Strahlung, Trockenheit oder mechanischen Verwundungen, schützen. Wundverschlussmittel werden in der Praxis eingesetzt. Selbsttrocknende Pflanzenölfilme könnten diese Funktion übernehmen. Auch ein Schutz vor zu hoher UV-Strahlung wäre möglich. Es konnte bereits gezeigt werden, dass eine Blattapplikation von Zink unter Zusatz von Huminsäure bei Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris*) das Pflanzenwachstum unter Hitzestress fördert (Ibrahim und Ramadan, 2015). Pflanzliche Inhaltsstoffe aus der Gruppe der Flavonoide und Hydroxyzimtsäure-Derivate sind beim UV-Schutz von Pflanzen beteiligt (Burchard et al., 2000). Methoxy-zimtsäure-2-ethylhexylester und Vitamin E sind bereits bei Äpfeln auf ihre UV-B-Wirkung getestet worden (Förschler et al., 2002). Die aus vielen Sonnenschutzcremes bekannten Titanoxide würden ebenfalls einen wirksamen physikalischen Sonnenschutz darstellen. Diese wurden bisher aber nicht geprüft.

Mit dem Projekt sollte versucht werden, den integrierten Pflanzenschutz um ein neues Verfahren der „trocknenden glyceridische Pflanzenöle“ zu erweitern. Diese können aufgrund ihrer fehlenden oder zumindest minimalen Ökotoxizität auch im ökologischen Anbau eingesetzt werden und zu einer Verringerung der Risiken für Mensch, Tier und Naturhaushalt beitragen. Als Verfahren wären trocknende Pflanzenöle in die gartenbauliche und landwirtschaftliche Praxis integrierbar. Mit dem Projekt sollte ein Beitrag zu einem umweltfreundlichen Pflanzenschutz geleistet werden, indem das Potenzial der trocknenden Pflanzenöle Bedingungen getestet und mögliche Mechanismen aufgezeigt werden, die eine Weiterentwicklung des Verfahrens ermöglichen. Die Untersuchungen zu den Wirkmechanismen, insbesondere der Filmbildung und der Bedeutung der Fettsäuren sollten dazu beitragen, das Verfahren hinsichtlich der Wirksamkeit und dem Verhalten in der Umwelt weiter zu verbessern. Neben der Wirksamkeit gegen Pathogene und Schädlinge wurde daher auch die direkte Wirkung auf die Pflanze untersucht.

Material und Methoden

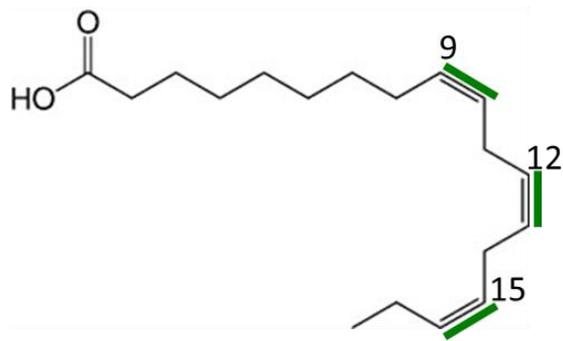
Als trocknende glyceridische Pflanzenöle wurden Lein- und Tungöl verwendet, die nach einem neuen und patentierten Verfahren hergestellt wurden (Breiing et al., 2021, Petry et al., 2017). Die im Projekt untersuchten Fettsäuren (Linolsäure, Linolensäure) wurden ebenfalls nach diesem Verfahren hergestellt. Als Vergleich wurde Rapsöl verwendet. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde Rapsöl nach dem gleichen Verfahren hergestellt und zusätzlich als zugelassenes Pflanzenschutzmittel Micula (Biofa, 85% Rapsölemulsion) eingesetzt. Als Vergleichsfungizid wurde Funguran Progress (Biofa, 537 g/kg Kupferhydroxid), welches auch eine Zulassung für den Ökologischen Landbau hat.

Die Auswahl der trocknenden Öle erfolgte aufgrund der Fettsäurezusammensetzung. Beide Öle enthalten als Hauptbestandteil eine 18:3-Fettsäure (Tabelle 1). Die Fettsäuren α -Linolensäure und α -Eleostearinsäure unterscheiden sich in der Stellung der Doppelbindung (siehe Abbildung 1). Hiermit sollte die Bedeutung der Konfiguration der Fettsäure für die Filmbildung und Wirkung näher untersucht werden.

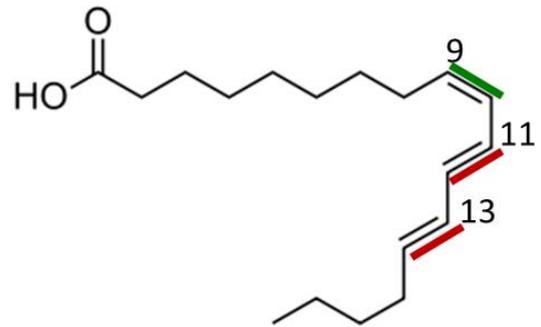
Tabelle 1: C-18-Fettsäurezusammensetzung der drei in dieser Studie untersuchten Pflanzenöle, deren Iod-Zahl und Trocknungskategorie (verändert nach Breiing et al., 2021)²

Fettsäure	Gehalt an Fettsäuren ¹ (%)		
	Leinöl	Tungöl	Rapsöl
Stearinsäure, 18:0	2-16	1-3	1-3
Ölsäure, 18:1	14-39	4-15	33-67
Linolsäure, 18:2	7-25	11-12	16-25
α -Linolensäure, 18:3	35-66	-	6-14
α -Eleostearinsäure, 18:3	-	64-80	-
Iod-Zahl	115-205	147-175	110-126
Trocknungskategorie	Trocknend	Trocknend	Nicht-trocknend bis semi- trocknend

¹Werte gerundet, ²Veröffentlichung im Rahmen des Projekts



α -Linolensäure



α -Eleostearinsäure

Abbildung 1: Chemische Struktur von α -Linolensäure (links) und α -Eleostearinsäure (rechts). Grün markiert sind Doppelbindungen in cis-Stellung, rot markiert sind Doppelbindungen in trans-Stellung. Die Zahlen geben die Stellung der Doppelbindung an.

Die im Projekt verwendeten Methoden sind ausführlich in Breiing et al., (2021) beschrieben. Diese Open Access-Publikation ist im Rahmen dieses Projekts gefördert worden und ist Bestandteil des Projektberichts, weshalb hier auf eine ausführliche Beschreibung der Methoden verzichtet wird. Besonderheiten, welche für das Verständnis notwendig sind, werden in den einzelnen Versuchen werden direkt in den Ergebnissen beschrieben.

Ergebnisse

Wirkung auf die Pflanzen

Für die Versuche zur Wirksamkeit war es wichtig zu zeigen, dass die angewandten Konzentrationen bzw. ausgebrachten Mengen zu keinen Schädigungen an den Pflanzen führen, um mögliche Wechselwirkungen oder Beeinträchtigungen wenn nicht auszuschließen, so doch zu minimieren. Zunächst wurde daher untersucht, ob die untersuchten Pflanzenöle eine direkte Wirkung – Phytotoxizität – auf Pflanzen haben.

Dazu wurde als Modellpflanze die Buschbohne gewählt. Bei den empfindlichen Primärblättern zeigten sich erst ab einer Konzentration von über 2% Symptome in Form von kleineren Läsionen (siehe Abbildung 2). Dieser Effekt wurde deutlicher ab einer Konzentration von 4%. Hier traten dann auch Blattrandrollen auf. Erst bei Konzentrationen ab 5% zeigten sich stärkere Wirkungen auf die Pflanze mit deutlichen Läsionen und abgestorbenen Interkostalfelder. Daher wurde für die folgenden Untersuchungen zur Wirksamkeit eine Ölkonzentration von 2% gewählt. Diese Wahl beruht auf der Annahme, dass hiermit die Wirksamkeit erhöht wird.

Es zeigte sich aber auch, dass die direkte Wirkung abhängig ist von der Pflanzenart und Entwicklung. So konnten im Freiland bei Apfel und Kartoffeln keine phytotoxischen Wirkungen beobachtet werden. Bei Tomatenjungpflanzen (3-Blattstadium) traten dagegen erste punktförmige Nekrosen bei einer Konzentration bei 0,75% auf, die jedoch das Pflanzenwachstum bis zu einer Konzentration von 2% nicht beeinträchtigten (siehe Abbildung 3).

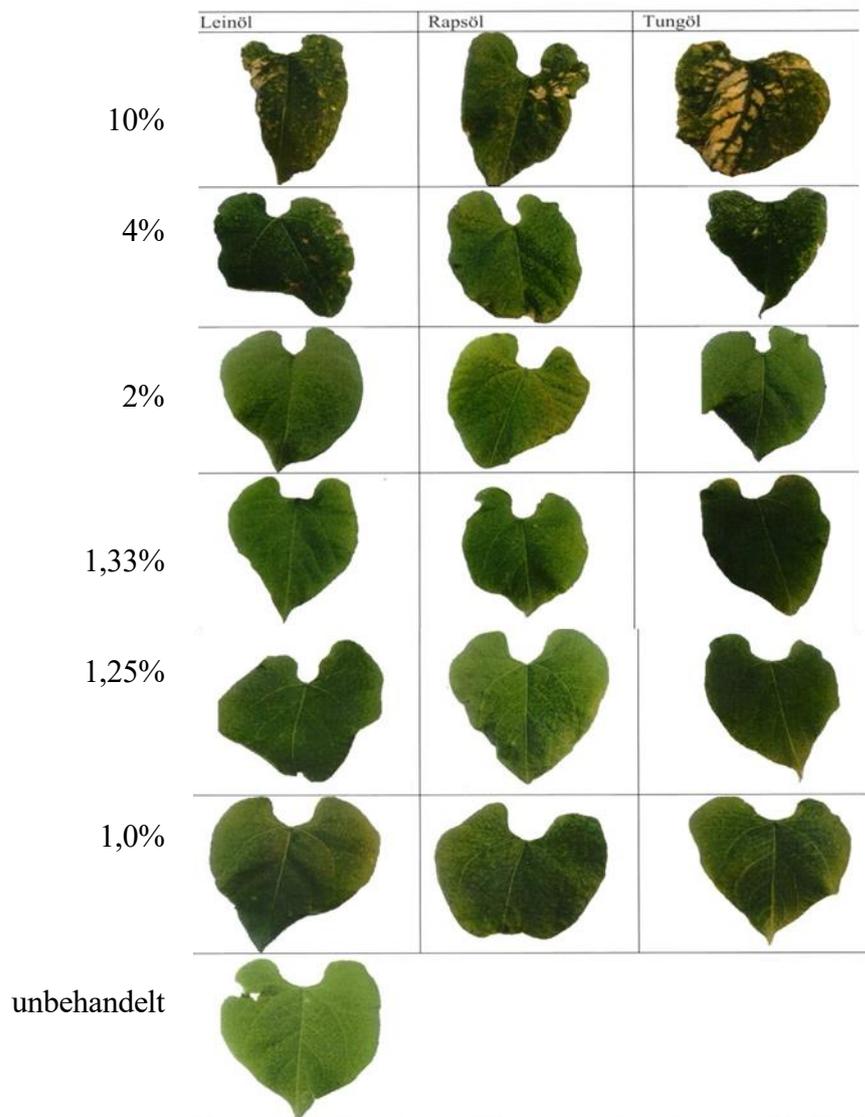


Abbildung 2: Phytotoxische Wirkung der drei untersuchten Pflanzenöle in Abhängigkeit von der Konzentration bei Primärblättern der Buschbohne zwei Tage nach Behandlung

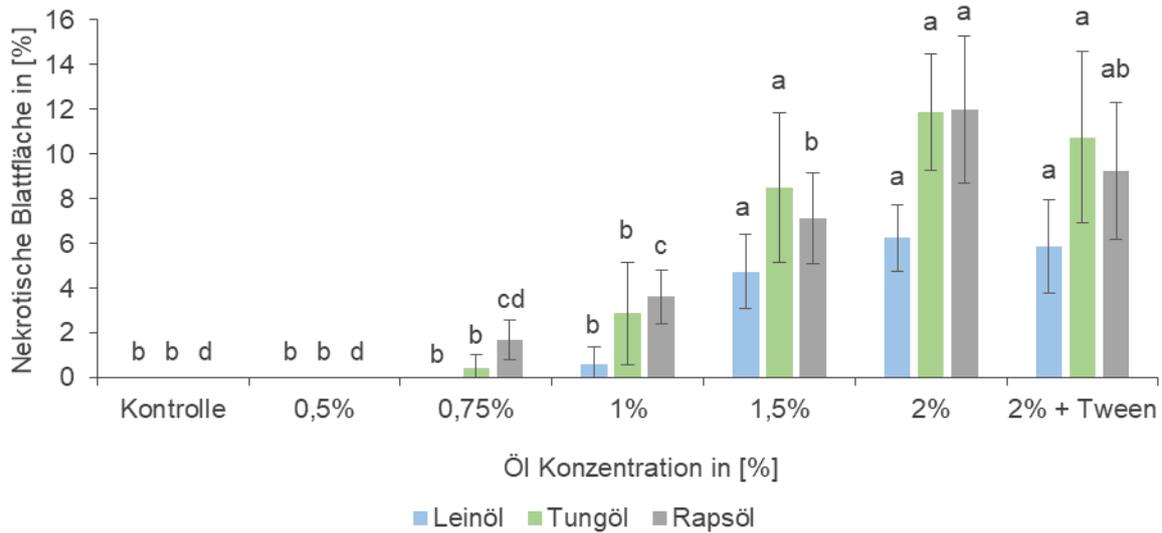


Abbildung 3: Phytotoxische Wirkung der drei untersuchten Pflanzenöle in Abhängigkeit von der Konzentration bei Tomatenfiederblättern vier Tage nach Behandlung.

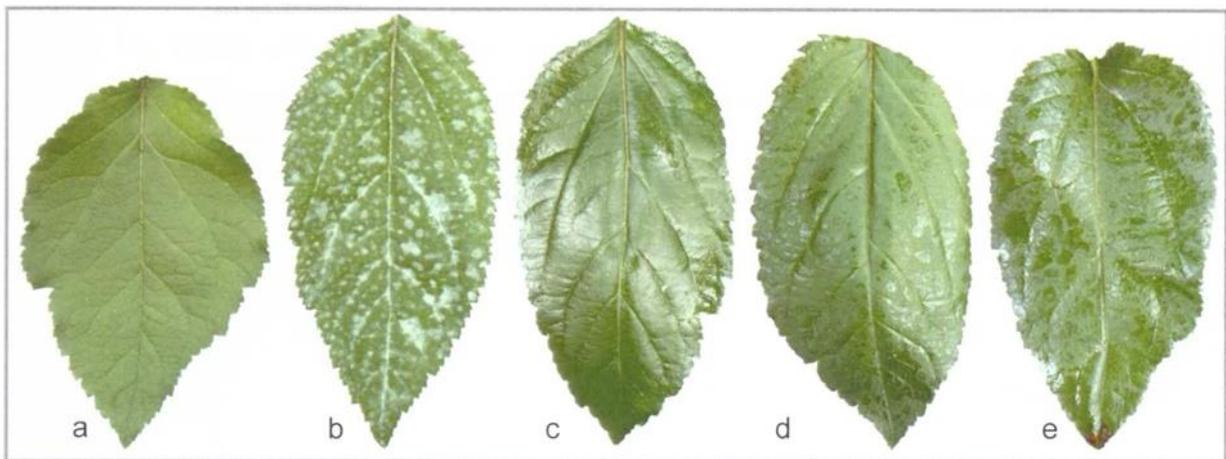


Abbildung 4: Spritzbeläge nach viermaliger Behandlung von Apfelblättern im Freiland. a = unbehandelte Kontrolle, b = Fungizid (Funguran Progress, Wirkstoff: Kupfer), c = Micula (Rapsölpräparat), d = 2% Tungöl, e = 2% Leinöl

Insbesondere für die Anwendung in der Praxis kann eine mehrfache Anwendung notwendig sein. Daher wurde an Apfel im Freiland und an Apfelsämlingen im Gewächshaus untersucht, wie sich eine mehrfache Applikation oder erhöhte Ölkonzentration auswirkt. Auch eine mehrfache Applikation bei Kartoffeln im Freiland (bis zu 6 Anwendungen in Abstand von 7 bis 10 Tagen mit 2%iger Ölkonzentration, 400 L pro Hektar) zeigte keine Schädigung bei Pflanzen. Eine viermalige Applikation bei Apfel in Freiland führte ebenfalls zu keiner Schädigung bei deutlich sichtbaren Spritzbelägen (siehe Abbildung 4). Auch eine Erhöhung der Konzentration und

wiederholter Anwendung zeigte keinerlei Blattschädigung bei Blättern von Apfelsämlingen im Gewächshaus (siehe Abbildung 5).

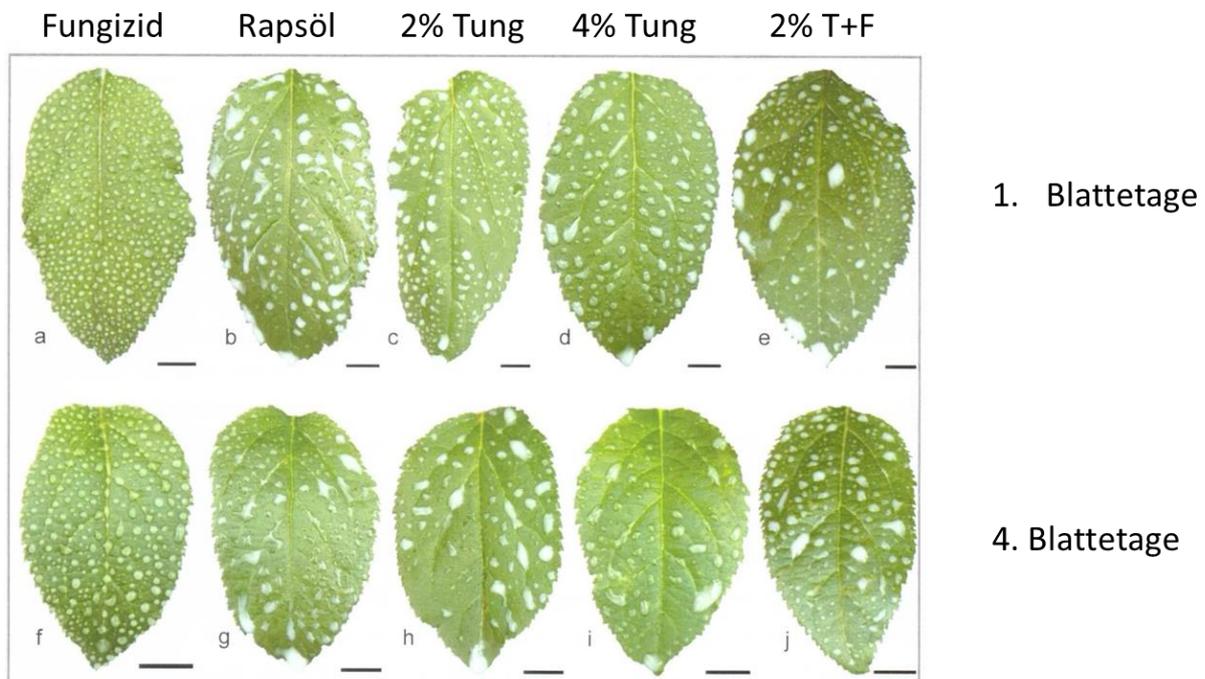


Abbildung 5: Spritzbeläge auf Blättern von Apfelsämlingen im Gewächshaus nach 2-maliger Behandlung. a-e = erste Blatttage, f-j = 4. Blatttage. a,f = Fungizid (Funguran Progress, Wirkstoff: Kupfer), b,g = Rapsöl (Micula), c,h = 2% Tungöl, d,i = 4% Tungöl, j,e = 2% Tungöl + Fungizid

Auf Rasterelektronenmikroskopischer Ebene zeigten sich deutliche Unterschiede der Spritzbeläge durch Lein- bzw. Tungöl (siehe Abbildung 6). Während der Film bei Leinöl eine netzartige Struktur aufweist (siehe gelbe Pfeile), erscheint der Film bei 2% Tungöl als durchgängiger „massiver“ Belag ohne erkennbare Strukturen (rote Pfeile). Es scheint so, dass das Tungöl die Pflanzenoberfläche und deren Strukturen maskiert, während dies bei Leinöl überlagert wird, aber die Blattstrukturen zumindest noch erkennbar bleiben. Dieser Unterschied wird bei höheren Vergrößerungen (siehe Abbildung 7 deutlich. Während es bei Leinöl so scheint, dass einzelne „Stränge“ zu erkennen sind, aber die Blattzellstrukturen noch erkennbar sind, ist es bei Tungöl so, dass die Blattstrukturen durch den Belag maskiert werden. Für mögliche Erkennungsreaktionen von auskeimenden Pilzsporen auf der Pflanze kann dies von ausschlaggebender Bedeutung für eine erfolgreiche Infektion sein, wie dies bereits von Mendgen (1978) für *Uromyces phaseoli* gezeigt wurde. Auch wenn das Erscheinungsbild durch mögliche Präparationsartefakte beeinflusst sein könnte, sind die Unterschiede zwischen Lein- und Tungöl

deutlich. Da die Art der Filmbildung bei der Wirksamkeit eine Bedeutung haben könnte, muss dies auch in zukünftigen Versuchen beachtet werden. Mit diesen Untersuchungen konnte erstmals gezeigt werden, dass die Filmbildung ölspezifisch ist.

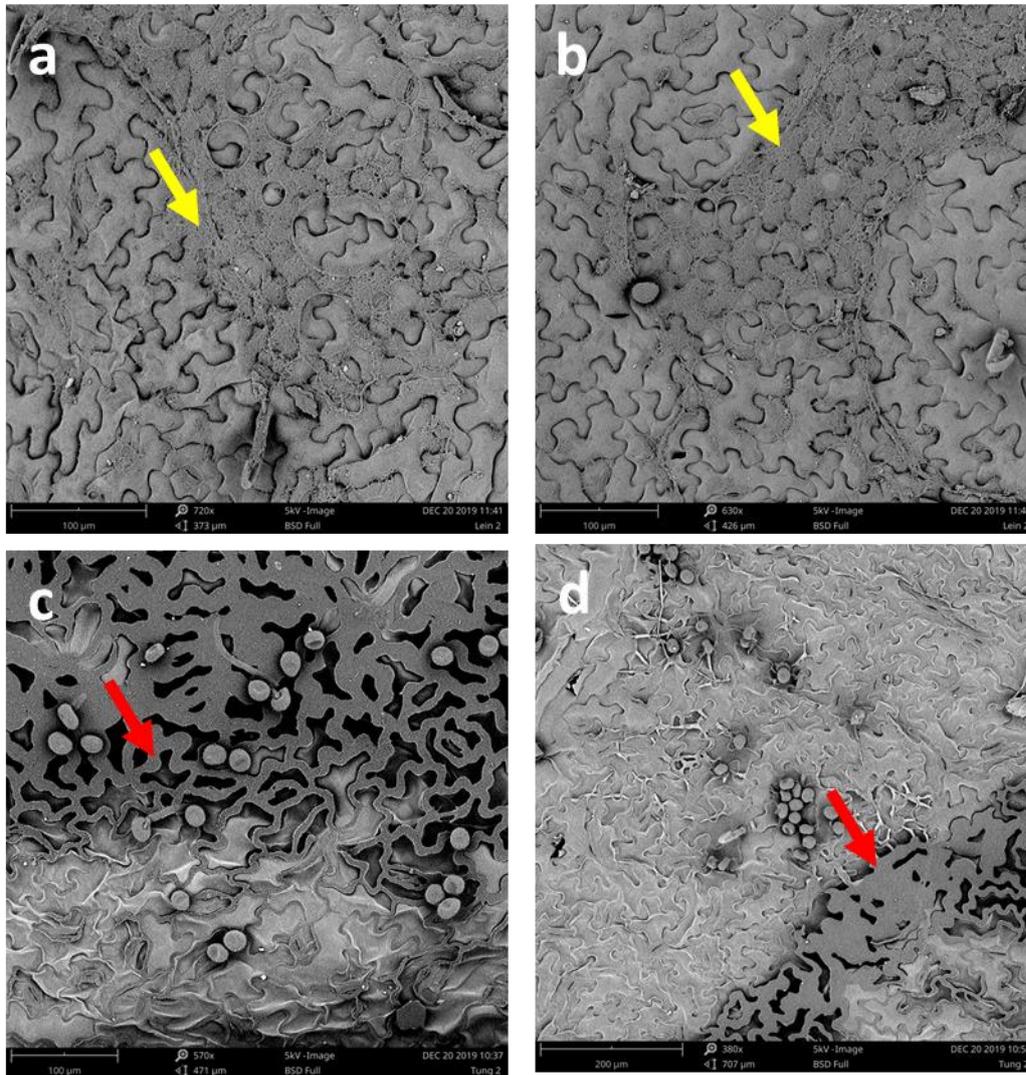


Abbildung 6: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der Spritzbeläge auf Primärblättern der Buschbohne. a,b: 2% Leinöl, c,d: 2% Tungöl. Messbalken = 100 μm

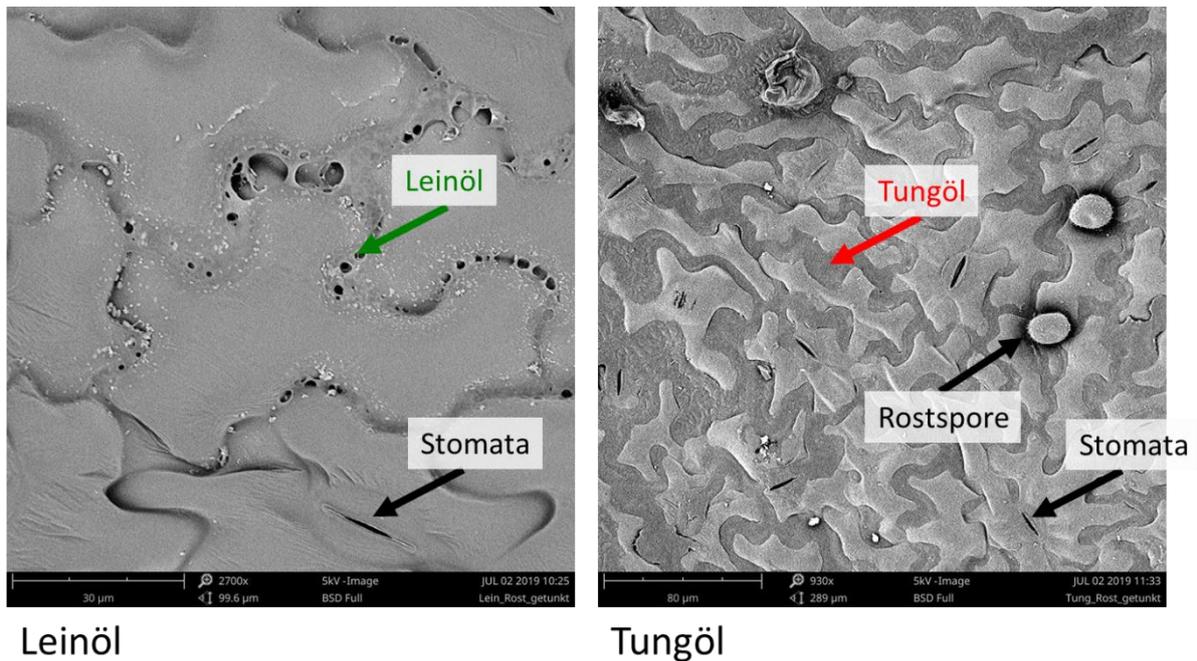


Abbildung 7: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der Spritzbeläge von 2% Leinöl (links, 2.700x) und 2% Tungöl (rechts, 930x) auf Primärblättern der Buschbohne

Doch obwohl eine direkte phytotoxische Wirkung bei einer Ölkonzentration bei 2% ausblieb, konnten physiologische Effekte beobachtet werden. Dazu wurde mittels Hyperspektralsensor (Polypen 400) die Reflektion der Wellenlängen im Bereich von 380 bis 790 nm gemessen. Aus den erhaltenen Reflexionsdaten wurden „Vegetationsindices“ berechnet. Der Greenness-Index (G) ist dabei ein Maß für das Chlorophyll und ist der Quotient der Wellenlängen 554 nm zu 677 nm (Zarco-Tejada et al., 2005). Dabei zeigte sich an der Modellpflanze Buschbohne, dass dieser „Grün-Index“ auf den behandelten Primärblättern weniger stark abfiel als dies bei der unbehandelten Kontrolle der Fall war (siehe Abbildung 8). Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die Ölbehandlung die Vitalität der Buschbohnenblätter positiv beeinflussen kann, auch wenn kein Befall vorliegt.

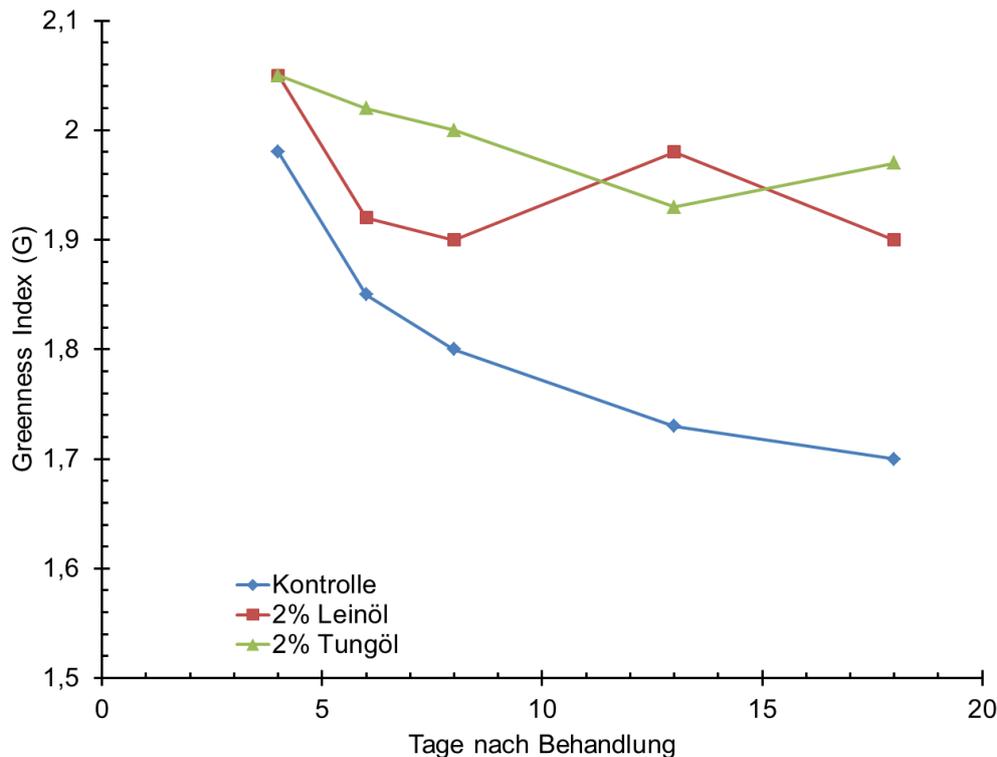


Abbildung 8: Physiologische Wirkung von 2% Leinöl und 2% Tungöl auf den „Grün-Index“ (GI) bei Buschbohne in Tage nach Behandlung.

Die Zusammenhänge zwischen der physiologischen Wirkung der selbsttrocknenden Öle hängen aber auch von den Umweltbedingungen ab. Behandelt man Buschbohnen mit trocknenden Pflanzenölen, so kann eine veränderte Reaktion gegenüber Stressfaktoren beobachtet werden. In einem Experiment mit 2% Tungöl wurden Buschbohnen täglich 6 Stunden UV-Strahlung ausgesetzt. 13 Tage nach dieser Behandlung konnten im hyperspektralen Muster im Wellenlängenbereich von 500-600 nm Veränderungen beobachtet werden (siehe Abbildung 9). UV-Licht erhöhte die Reflexionswerte in der unbehandelten Kontrolle. Eine Behandlung mit Cutisan, welches zur Vermeidung von Sonnenbrand eingesetzt wird, veränderte die Reaktion nicht (a). Tungöl führte zu einer deutlichen Erhöhung der Reflexionswerte unter UV-Licht (b). Eine gleichzeitige Behandlung von 2% Tungöl und Cutisan reduzierte den zuvor beobachteten Effekt durch Tungöl deutlich (c). Dies zeigt abermals, dass eine Behandlung durch trocknende Öle physiologische Reaktionen in der Pflanze auslösen kann. In diesem Fall eine veränderte Stressreaktion gegenüber UV-Licht. Ob dieser Effekt gezielt genutzt werden kann, konnte in diesen Experimenten nicht eindeutig beantwortet werden, weil die Biomasse nicht verändert war. Es wurden auch keine Versuche unter UV-Licht mit Pathogenen durchgeführt.

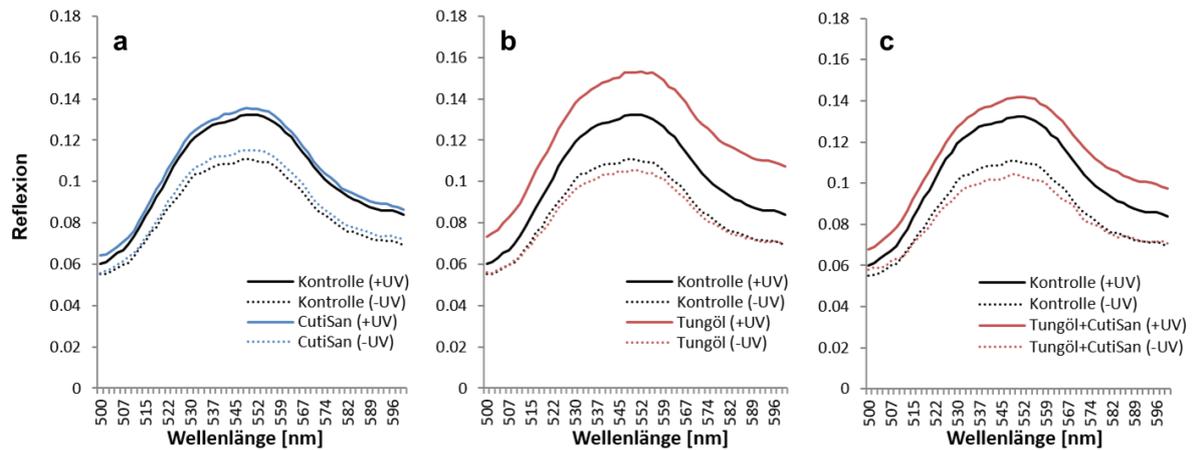


Abbildung 9: Vergleich des Reflexionsmusters (500-600nm) von Buschbohnen nach täglicher UV-Bestrahlung von 6 Stunden und ohne UV-Bestrahlung, 13 Tage nach Behandlung mit (a) Cutisan, (b) 2% Tungöl und (c) Kombination von 2% Tungöl und Cutisan. Kontrolle: unbehandelt.

Neben der Stressreaktion gegenüber UV-Licht wurde auch die Wirkung der trocknenden Öle gegenüber Trockenstress untersucht. Dazu wurden mit den Ölen behandelte Buschbohnen nach der Behandlung für drei Tage nicht mehr bewässert und die Reaktion der Pflanzen über neun Tage beobachtet (siehe Abbildung 10). Bis drei Tage nach Stressbeginn stieg der stomatare Widerstand in der Kontrolle an (siehe Abbildung). Dieser Anstieg war bei 2% Leinöl (A) deutlich abgeschwächt und bei 2% Tungöl (B) sehr gering. Nach Ende der Stressphase sank der stomatare Widerstand in der Kontrolle wieder auf das Niveau der bewässerten Kontrolle. Beide Öle reduzierten also den induzierten Stress. Hierfür könnte die Filmbildung entscheidend sein, wenn dadurch ein Teil der Stomata abgedeckt wurde und so die Transpiration reduziert wird. Diese ölbedingte verringerte Transpiration würde eine veränderte Stomataregulation kompensieren, wie sie in der Kontrolle zu beobachten war. Somit würde eine mechanisch bedingte Reduktion der Transpiration dem Trockenstress entgegenwirken. Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass Transportprozesse in der Pflanze durch Transpiration ebenfalls reduziert sein können.

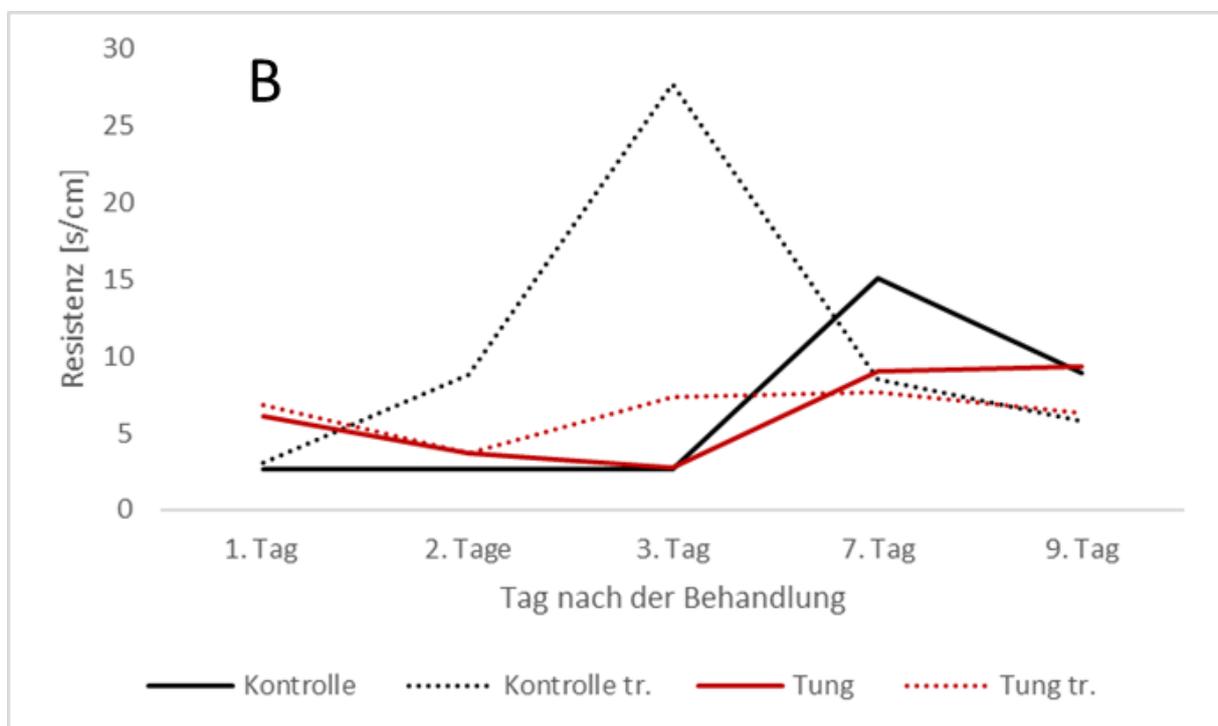
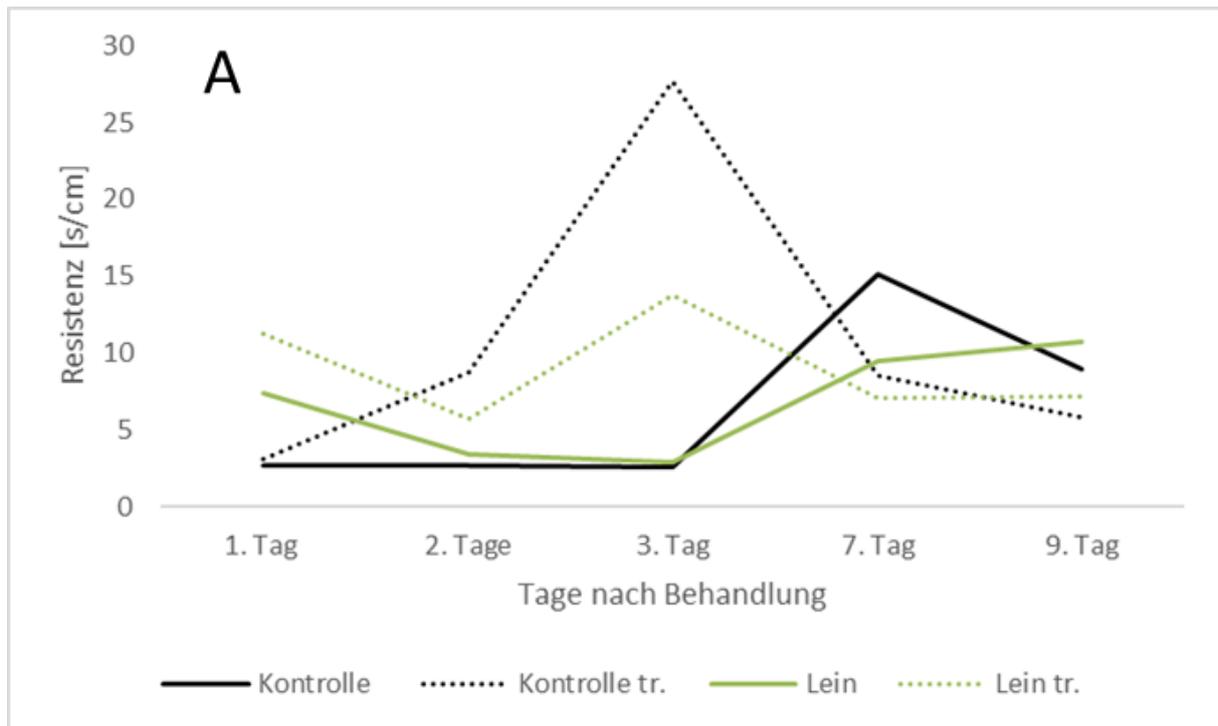


Abbildung 10: Einfluss von 2% Leinöl (A) und 2% Tungöl (B) auf den stomatären Widerstand (Resistenz, S/cm) im Vergleich zur Kontrolle ohne (durchgezogene Linie) und unter (gepunktete Linie) Trockenstress.

In diesem Kontext konnte dann gezeigt werden, dass für die Wirkung der unterschiedlichen Öle die Fettsäuren einen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktion der Pflanze haben können. An Buschbohnen wurde die Wirkung der Linolsäure (Hauptbestandteil des Rapsöls) und der

Linolensäure (Hauptbestandteil der Leinsäure) miteinander auf den Plant Senescence Reflection Index (kurz: PSRI) und den Normalized Difference Vegetation Index (kurz NDVI) untersucht. Der PSRI ist ein Stressindikator (Merzlyak et al., 1999) während der NDVI eine Maß für die photosynthetische Aktivität und damit auch der Vitalität von Pflanzen (Rouse et al., 1973). Es zeigte sich, dass die Reaktion der Pflanze gegenüber Linolensäure schon bei geringeren Konzentrationen (2,4%) einsetzt als bei der Linolsäure (3,75%), und dass der Effekt geringer ist (siehe Abbildung 11). Hiermit konnte gezeigt werden, dass zumindest ein Teil der Wirkung auf die Pflanze durch die Fettsäure bedingt ist. Linolsäure (18:2) hat nicht die trocknenden Eigenschaften wie sie für die Linolensäure (18:3) beschrieben sind. Ein umgekehrter Effekt konnte beim NDVI beobachtet werden (siehe Abbildung 11).

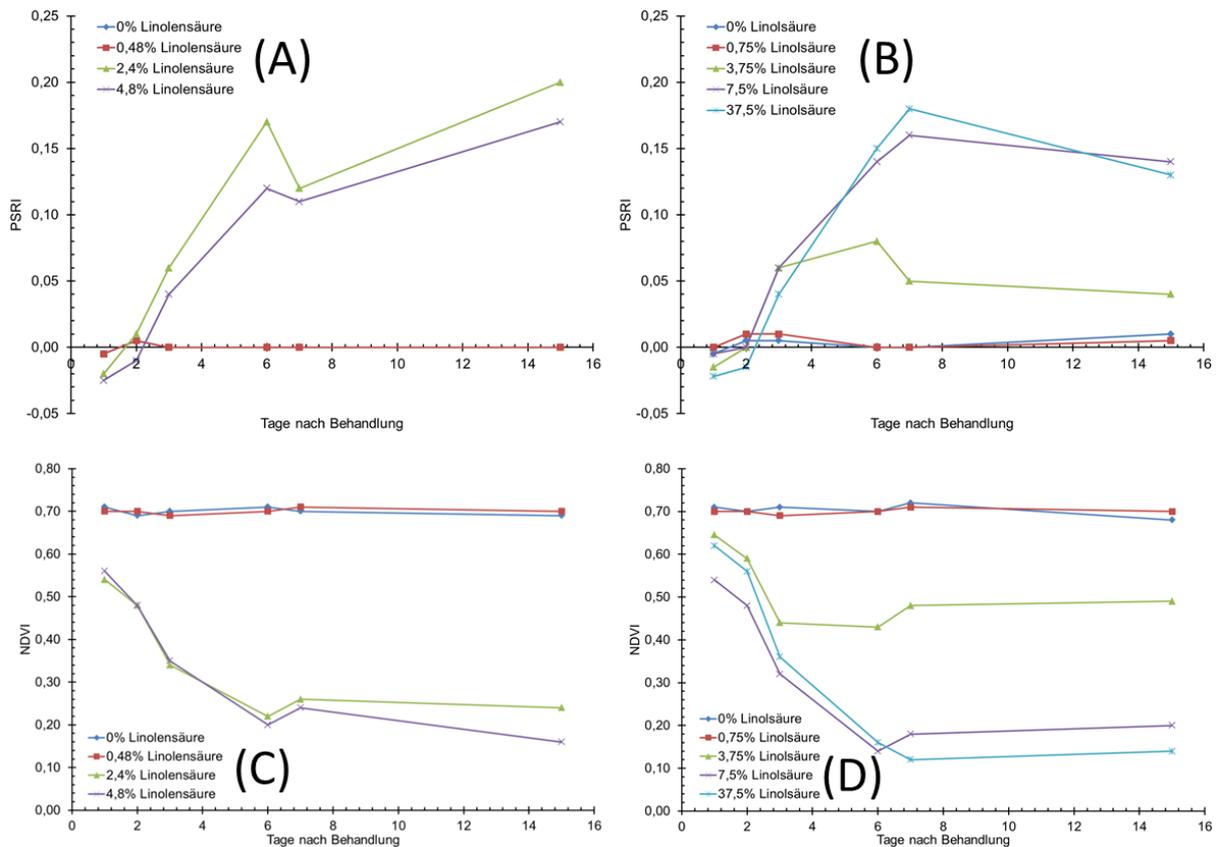


Abbildung 11: Einfluss von Linolensäure (A, C) und Linolsäure (B, D) auf den PSRI (A, B) und NDVI (C, D) im zeitlichen Verlauf nach der Behandlung.

Steigende Konzentrationen führten zu einem reduzierten NDVI Auch hier war der Effekt bei der Linolensäure bei ähnlichen Konzentrationen stärker als der von Linolsäure. Dies könnte auf die höhere Anzahl an Doppelbindungen zurückgeführt werden. Ähnliche Unterschiede konnten für weitere Vegetationsindices beobachtet werden. Dazu gehören der Photochemical Reflectance

Index (PRI, Gamon et al., 1992). Auf eine Darstellung soll an dieser Stelle verzichtet werden, weil sich daraus keine prinzipiell anderen Schlussfolgerungen ziehen lassen.

Zusammenfassend kann aus diesen Untersuchungen festgestellt werden,

1. dass die getesteten Pflanzenöle (Raps-, Lein- und Tungöl) ab einer Konzentration über 2% in Abhängigkeit der Pflanze und des Entwicklungsstadiums zu phytotoxischen Nebenwirkungen führen können.
2. dass die gebildeten Beläge von Lein- und Tungöl unterschiedlich in ihrer Struktur sind
3. dass Lein- und Tungöl die Pflanzenphysiologie beeinflussen
4. und dass diese Wirkung (zumindest teilweise) durch die Fettsäuren in den Ölen bedingt ist.

Fungizide Wirkung am Model Buschbohne

Im Rahmen der fungiziden Wirkung wurden folgende Untersuchungen

- Dosis-Wirkungsbeziehung. Hierbei sollte untersucht werden, ob die Wirkung gegenüber Pilzen von der Konzentration abhängig ist. Dies steht in einem direkten Zusammenhang mit einer möglichen phytotoxischen Wirkung. Eine ausreichende und sichere Wirkung sollte unterhalb der Konzentration erreichbar sein, die bei Pflanzen zu Schädigungen führen kann.
- Protektive und kurative Wirkung der Behandlung.
- Abwaschbarkeit (Regenfestigkeit) der Wirkung
- Die mögliche systemische Wirkung. Hierzu wurde der Befall auf behandelten und nicht-behandelten Blättern beobachtet.
- Kombination von Ölen, um möglich mögliche additive, subtraktive oder synergistische Wirkungen feststellen zu können.

*Anmerkung: Die Untersuchungen am Pathosystem Buschbohne und Buschbohnenrost (*Uromyces appendiculatus*) wurden im Januar 2021 in der Sonderausgabe „Natural Products for Plant Pest and Disease Control“ der Zeitschrift „Plants“ veröffentlicht. Diese Open-Access-Publikation ist Bestandteil dieses Projektberichts und kann unter <https://doi.org/10.3390/plants10010143> abgerufen werden. Daher soll an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung von Material & Methoden verzichtet werden.*

Konzentrationsabhängigkeit der Wirkung

Die Primärblätter wurden zwei Tage vor der Inokulation mit Rostsporen mit Ölemulsionen in einem Konzentrationsbereich von 1% bis 10% behandelt. Nach der Ausbildung der Rostpusteln auf den Blättern wurde der Befall bonitiert. Bereits bei 1% lag eine sehr gute Wirkung bei Lein- und Tungöl vor und betrug im Mittel über 90% gegenüber der unbehandelten Kontrolle. Die Wirksamkeit von Rapsöl war geringer und betrug im Mittel zwischen 40% bis 60%, ohne dass eine Konzentrationsabhängigkeit der Wirkung zu beobachten war (siehe Abbildung 12).

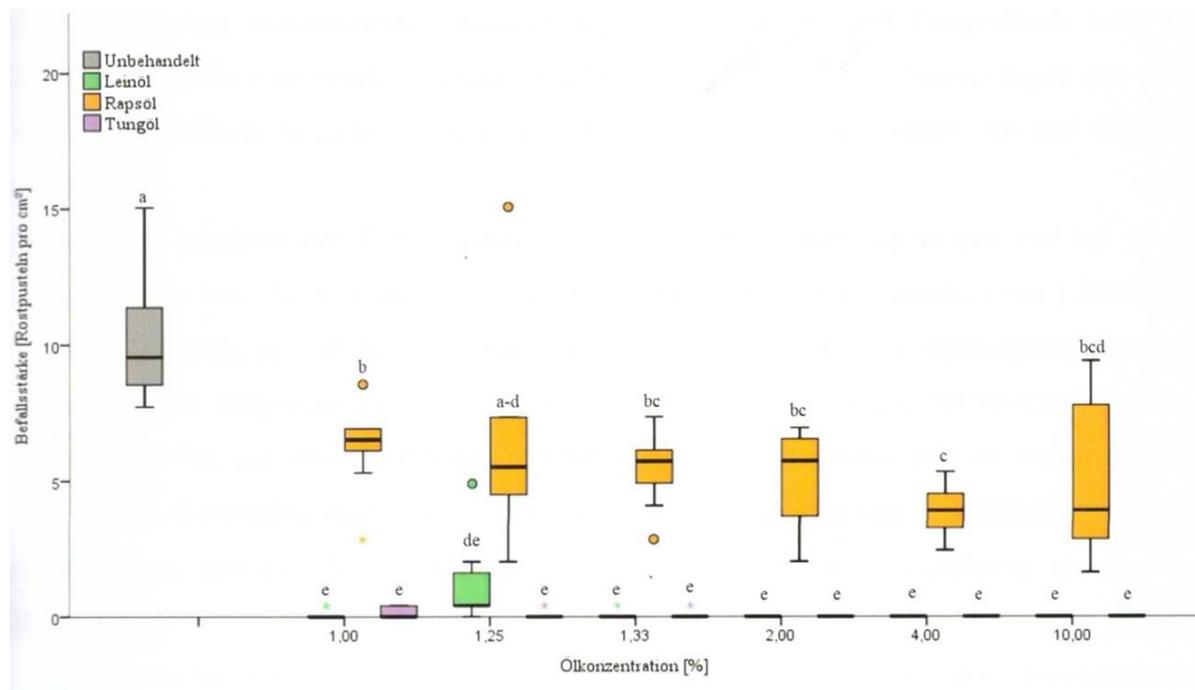


Abbildung 12: Wirkung von Raps-, Lein- und Tungöl gegenüber *Uromyces appendiculatus* bei Buschbohnen in Abhängigkeit von der Ölkonzentration. Öle wurde zwei Tage vor der Inokulation appliziert. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (ANOVA, Tukey-HSD, $p \leq 0,05$, $n \geq 5$)

Protektive und kurative Wirkung

Von besonderer Bedeutung sind die protektive und kurative Wirksamkeit von Pflanzenschutzmaßnahmen, weil sie die Terminierung – also das Zeitfenster, in der eine erfolgreiche Bekämpfung des Pathogens möglich ist – bestimmen. Über mehrere Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass eine gute bis sehr gute protektive Wirkung der trocknenden Öle (Lein, Tung) bis 4 Tage vor der Inokulation gegeben ist (siehe Abbildung 13). Auch 6 Tage vor Inokulation ist diese immer noch vorhanden. Eine kurative Wirkung lag zwar noch bis 4 Tage nach der Inokulation vor, war aber deutlich geringer ausgebildet. Die protektive Wirksamkeit war in diesen Versuchen sogar mit zwei kommerziellen Produkten vergleichbar, lag aber deutlich

hinter der eines systemischen Fungizids (Fu). Die Wirksamkeit der der trocknenden zum nicht-trocknenden Öl war vergleichbar, obwohl an einzelnen Tagen signifikante Unterschiede zu beobachten waren. Damit konnte in diesen Versuchen gezeigt werden, dass

1. eine ausreichende protektive Wirkung vorlag,
2. eine – wenn auch geringere – kurative Wirkung vorlag,
3. diese Wirkung über einen längeren Zeitraum vor bzw. nach Inokulation gegeben ist.

Damit lassen sich trocknenden Pflanzenöle in den Integrierten Pflanzenschutz integrieren und die Applikation nach Maßgabe von Prognosemodellen gut zeitlich festlegen. Die schnelle Trocknung von Lein- und Tungöl an der Luft macht auch eine Applikation bei ungünstigeren Witterungsbedingungen noch möglich.

„Regenfestigkeit“ von trocknenden Ölen

Die trocknenden Öle zeichnen sich durch eine schnelle Trocknung an der Luft und durch eine schlechtere Wiederbenetzung aus. Dadurch sollte der Spritzbelag stabil auf der Pflanze auch bei ungünstigen Witterungsbedingungen oder sogar Regen sein. Um diese Hypothese zu prüfen wurden 2% Lein- oder Tungöl auf Primärblätter der Buschbohne appliziert. Zwei Stunden nach Applikation wurden die Blätter aus etwa ein Meter Höhe mit Hilfe einer Gießkanne abgebraust. Die Wassermenge entsprach dabei etwa 10 L m^{-2} . Als Vergleich wurde ein kommerzielles Kupferpräparat entweder alleine oder in Kombination mit den Ölen ausgebracht. Die unbehandelte Kontrolle wurde ebenfalls mit Wasser abgebraust. Bei der Kontrolle zeigte sich auf den abgebrausten Blättern ein geringerer Befall als auf den nicht abgebrausten Blättern (siehe Abbildung 14). Die protektive Wirkung von Leinöl war in diesen Versuchen größer als die von Tungöl, aber beide Öle zeigten wieder eine ausreichende Wirksamkeit gegenüber *Uromyces appendiculatus* auf Primärblättern der Buschbohne. Die Wirkung von Tungöl war dabei vergleichbar mit dem Kupferpräparat Funguran Progress und bei der Kombination zeigte sich sogar eine verbesserte Wirksamkeit gegenüber dem Buschbohnenrost. Ein Abbrausen der Blätter führte in keinem Fall zu einer Reduktion der Wirkung. Ob stärkerer Regenereignisse die Wirksamkeit beeinträchtigen würden, konnte mit diesen Versuchen nicht belegt werden.

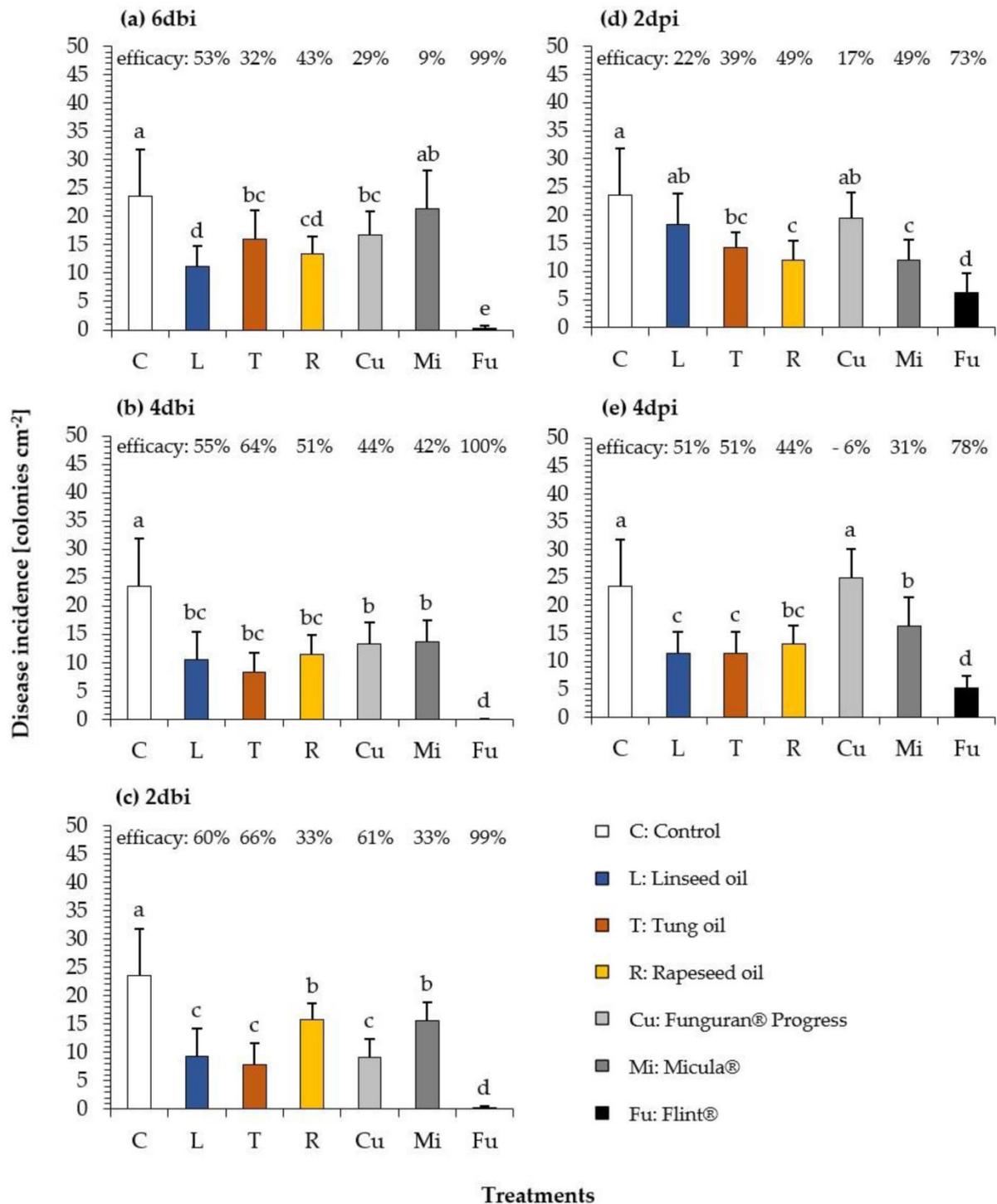


Abbildung 13: Protektive (2 bis 6 dbi) und kurative (2 bis 4 dpi) Wirksamkeit gegenüber Buschbohnenrost von trocknenden (Lein- und Tungöl) Pflanzenölen im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle, einem nicht-trocknenden (Rapsöl, Micula: Rapsölprodukt) Öl und einem Fungizid. dbi = Tage vor Inokulation, dpi = Tage nach Inokulation. Abbildung aus Breiung et al. (2021).

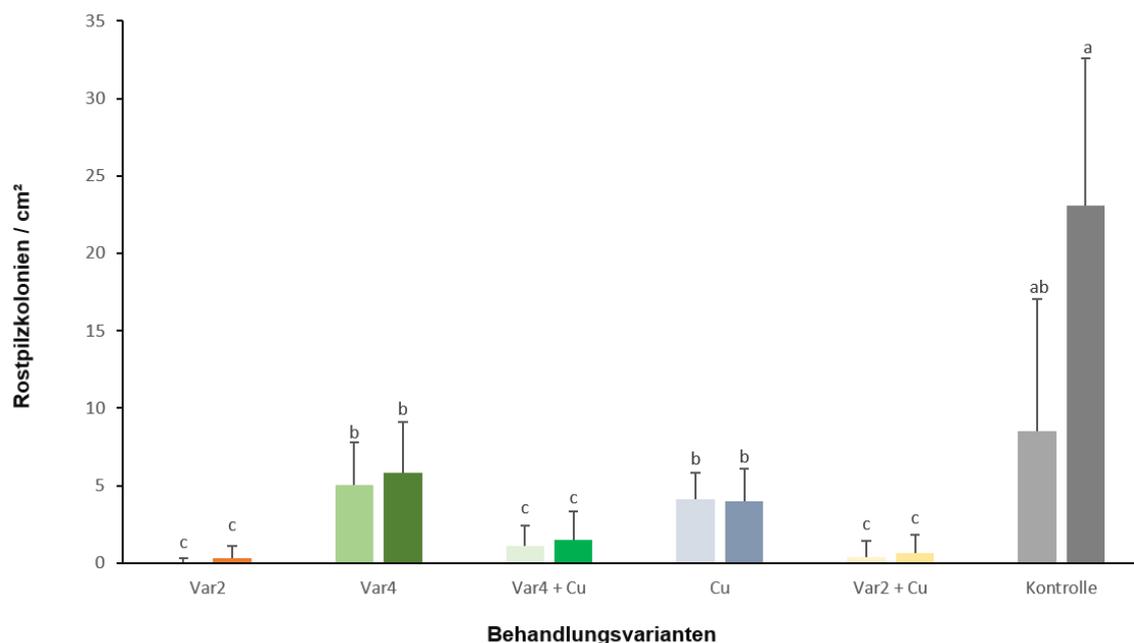


Abbildung 14: Protektive (2 dbi) Wirksamkeit von 2% Lein (Var2) - bzw. Tungöl (Var4) alleine oder in Kombination mit einem Kupferpräparat (Cu) auf den Befall von Buschbohnen mit *U. appendiculatus* ohne (rechte Säule) und nach (linke) Säulen der Simulation eines Regenerenignisses von 10 L m⁻².

Systemische Wirkung

Die systemische Wirkung von Pflanzenölen (Gesamtkonzentration: 2%) wurde am Pathosystem Buschbohne und *U. appendiculatus* unter den zuvor schon beschriebenen Versuchsbedingungen getestet. Die Applikation erfolgte protektiv zwei Tage vor der Inokulation mit Rostsporen (siehe Breiing et al., 2021). In diesen Versuchen wurde als zusätzliche Kontrolle 1% Huminsäure als Pflanzenstärkungsmittel eingesetzt. Bei allen drei untersuchten Ölen konnte eine sehr gute Wirkung gegenüber dem Bohnenrost auf der behandelten (distalen) Hälfte des Primärblatts beobachtet werden (siehe Abbildung 15). Auf dem nicht behandelten (Proximalen) Teil des Blattes blieb die Wirkung dagegen vollständig aus. Eine systemische Wirkung innerhalb des Blattes konnte damit nicht gezeigt werden. Huminsäure selbst führte zu keiner Befallsreduktion. Auch in Kombination mit einem trocknenden Öl konnte keine Veränderung gegenüber der alleinigen Öl-Behandlung beobachtet werden. Auffällig war in diesem Experiment, dass die Kombination aller drei Öle die geringste und statistisch nicht signifikante Wirkung hatte. Aus diesen Versuchen ging hervor, dass eine systemische Wirkung nicht zu erwarten ist. Versuche an Tomaten zeigten jedoch, dass eine systemische Wirkung vorliegen kann. Diese Versuche werden bei der Wirksamkeit gegenüber *Phytophthora infestans* an Tomate beschrieben und diskutiert.

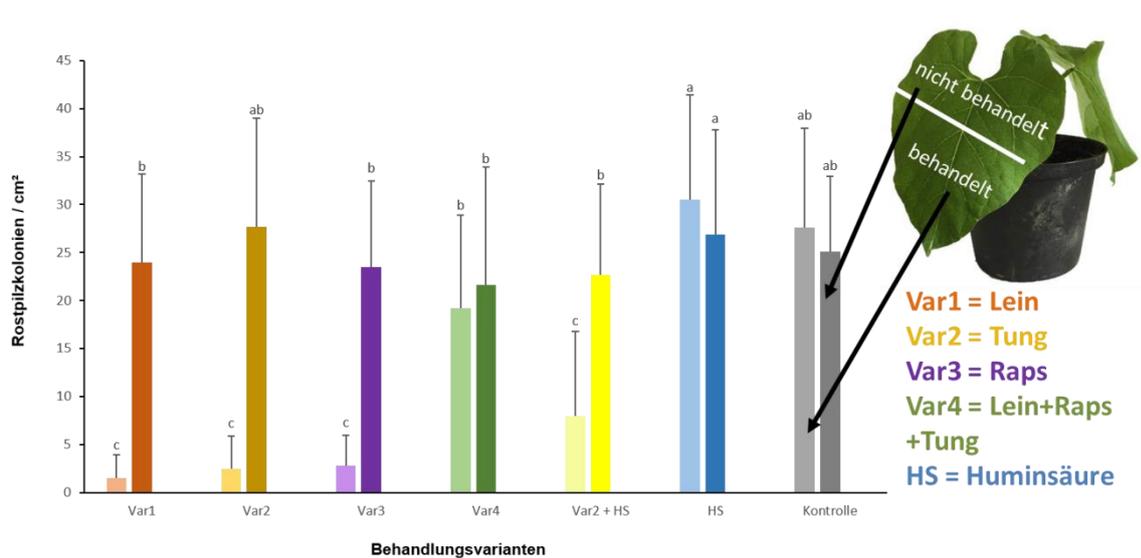


Abbildung 15: Systemische Wirkung von trocknenden (Lein-, Tungöl), einem nicht trocknenden Öl (Rapsöl) sowie Huminsäure (1%) alleine oder in Kombination auf den Rostbefall von Buschbohnen.

Wirkung auf die Sporenkeimung

Die Untersuchungen im Wirt-Parasit-System Buschbohne und *U. appendiculatus* zeigten, dass eine gute protektive und auch kurative Wirkung der trocknenden Öle vorlag. Die Filmbildung der trocknenden Öle legte nahe, dass die ersten Erkennungsreaktionen in der Wirt-Parasit-Interaktion beeinflusst werden können. Hierfür haben wir die Sporenkeimung näher untersucht. Die Behandlung erfolgte hier Protektiv -36, -24 und -12 Stunden vor der Inokulation und kurativ 12 bzw. 24. Die Auswertung der Sporenkeimung und der Pilzentwicklung wurde 12, 24 und 48 Stunden nach Inokulation erfasst. Dazu wurde zunächst ein Boniturschema erstellt, welches sich an der mikroskopischen Entwicklung ausrichtet (siehe Abbildung 16).

Aus den mikroskopischen Beobachtungen wurde folgendes Boniturschema entwickelt:

- (0) keine Keimung
- (1) Keimschlauch ausgebildet
- (2) Keimschlauch, Infektionsstrukturen bis zur Bildung eines Appressoriums
- (3) Deutliche Infektionsstrukturen, Appressorien
- (4) Myzelbildung
- (5) Sporulation

In dem Beobachtungszeitraum von 48 Stunden konnte noch keine Myzelbildung oder Sporulation beobachtet werden.

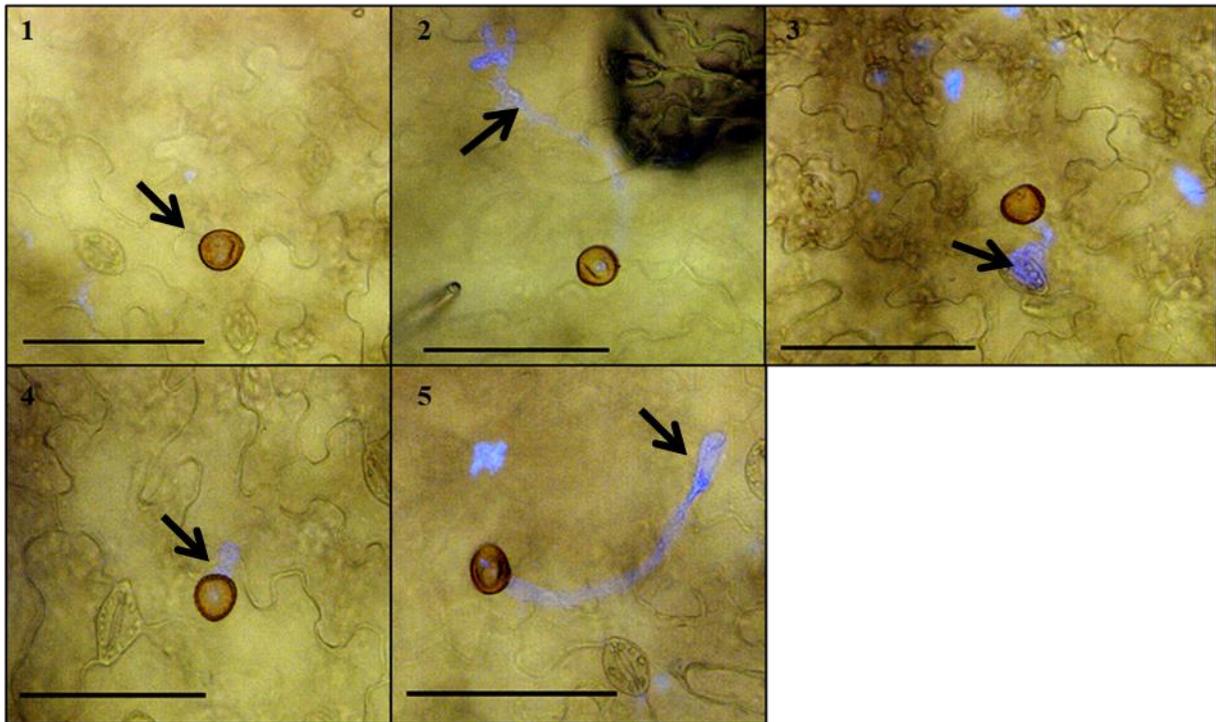


Abbildung 16: Fröhe Infektionsstrukturen von *U. appendiculatus* auf Buschbohnenblätter. 1: nicht gekeimte Spore, 2: Sporenceimung mit Keimschlauch, 3: Keimschlauchbildung mit Appressorium über Stomata, 4: nicht erfolgreiche Sporenceimung, 5: Keimschlauch mit Appressorium nicht über Stomata. Exemplarische Darstellung (nach Hillmer, 2018)

Bereits 12 Stunden nach Inokulation zeigten sich erste Unterschiede gegenüber der mit Wasser behandelten Kontrolle. Dabei war die Wirkung tendenziell abhängig vom Zeitintervall der protektiven Behandlung (-26, -24, -12 Stunden). Je kürzer das Zeitintervall desto deutlicher war der Effekt auf die Keimung. Die deutlichste Wirkung zeigte dabei 2% Tungöl (siehe Abbildung 17), gefolgt von Lein- und Rapsöl sowie dem Fungizid. In diesen Versuchen wurde auch *Micula* als kommerzielles Rapsölprodukt eingesetzt. In der Wirkung war es deutlich zu unterscheiden vom Rapsöl, welches nach dem gleichen Verfahren wie die trocknenden Lein- und Tungöl hergestellt wurde (Breiing et al., 2021). Das könnte bedeuten, dass das Herstellungsverfahren einen (positiven) Einfluss auf die Wirksamkeit der Öle hat.

24 Stunden nach der Inokulation verstärkten sich die beobachteten Effekte. Dies kann als Hinweis gewertet werden, dass die Entwicklung gegenüber der Kontrolle verzögert ist (siehe Abbildung 17). Hier zeigten sich auch Unterschiede zwischen den trocknenden Ölen (Lein, Tung) und Rapsöl. Die Wirkung der trocknenden Öle war größer. Dies stimmt mit unserer Annahme überein, dass die trocknenden Öle einen Film auf den Pflanzen bilden, welche die Infektion beeinflussen. Der Unterschied zwischen Lein- und Tungöl deutet zudem darauf hin,

dass die Art des Films ebenfalls von Bedeutung sein könnte. Nach 24 Stunden konnte auch der Effekt einer kurativen Behandlung (12 Stunden nach Inokulation) beobachtet werden. Obwohl die Unterschiede nicht signifikant waren, zeigten sich die gleichen Tendenzen wie bei einer protektiven Behandlung. Es scheint also möglich, dass auch noch kurze Zeit nach einem Befall in die Entwicklung von *U. appendiculatus* eingegriffen werden kann.

48 Stunden nach Inokulation zeigte sich ein zweigeteiltes Bild. Während die Effekte einer protektiven Behandlung vergleichbar zu 12 und 24 Stunden waren, zeigte sich eine etwas andere Tendenz bei der kurativen Behandlung. Die beiden kommerziellen Präparate Micula und Funguran Progress reduzierten die Entwicklung deutlicher als die Öle nach dem Herstellungsverfahren für die trocknenden Öle. Es war aber noch ein Effekt auf die Pilzentwicklung zu beobachten, welcher auch bis auf eine Ausnahme (Lein, 12 Stunden kurativ) signifikant war. Die Effekte waren aber geringer als bei protektiver Behandlung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass insbesondere das trocknende Tungöl die Entwicklung von *U. appendiculatus* in den ersten 48 Stunden signifikant verzögert, und dass auch tendenzielle Unterschiede zum trocknenden Leinöl zu beobachten sind. Dieser Unterschied könnte auf die zuvor beschriebenen Unterschiede in der Filmbildung zwischen diesen beiden Ölen beruhen. Eine kurative Wirkung konnte zwar beobachtet werden, jedoch ist diese geringer als die protektive. Dies wird auch in der Befallswirkung gegenüber dem Pilz deutlich.

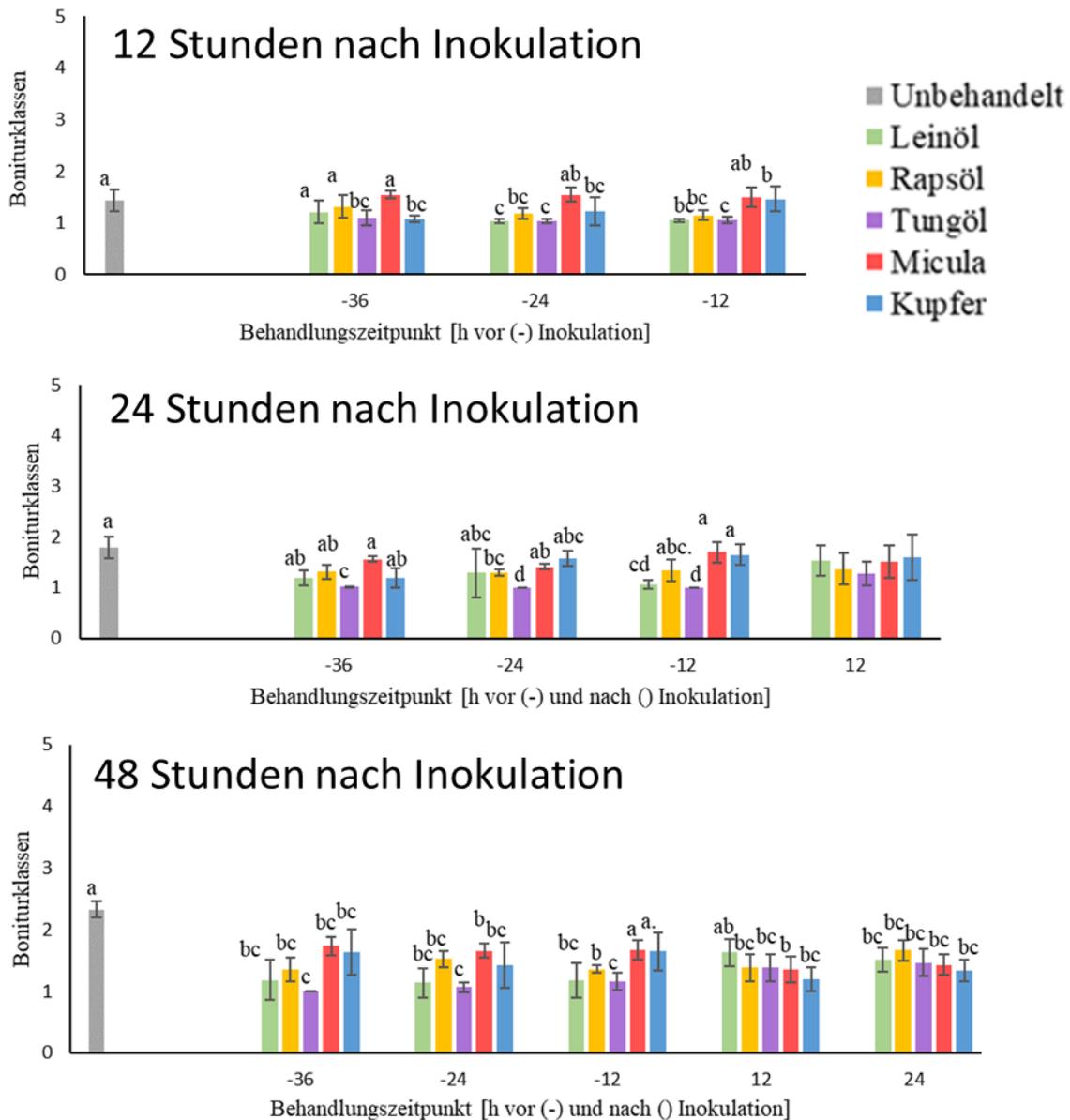


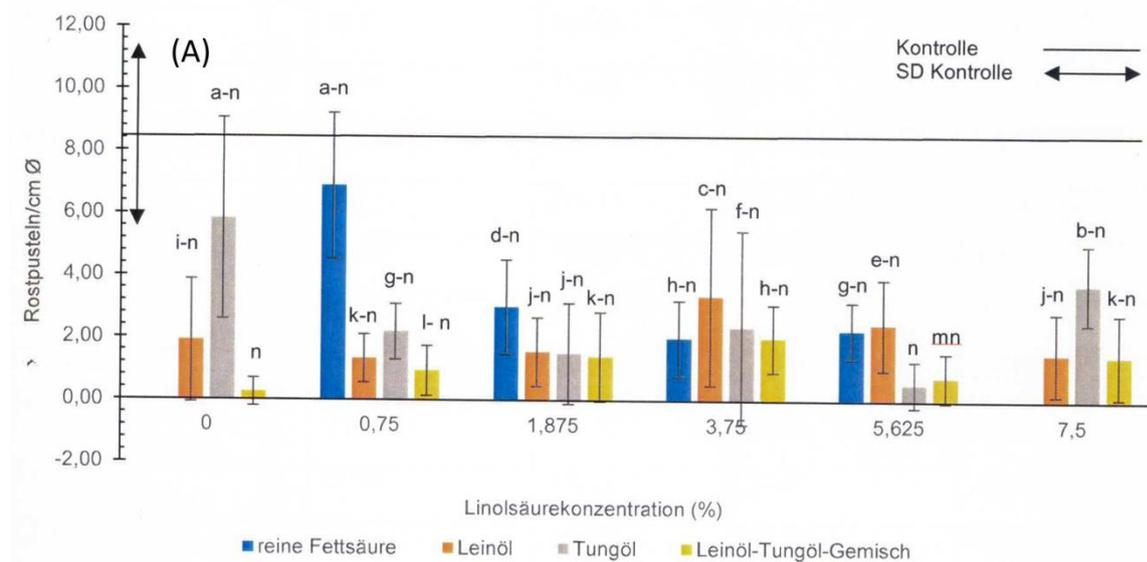
Abbildung 17: Entwicklung von *U. appendiculatus* auf Buschbohne in Abhängigkeit der Behandlung mit trocknenden (Lein, Tung), nicht-trocknenden Öl (Raps) und zwei Vergleichspräparaten (Micula, Kupfer: Funguran Progress) nach 12, 24 und 48 Stunden nach Inokulation. Die Entwicklung wurde anhand des erstellten Boniturschemas vorgenommen. Signifikante Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, Tukey-HSD, $p < 0,05$, $n=10$)

Wirkung bei Zusatz von Linolsäure und bei Ölgemisch

Um zeigen zu können, ob ein Zusatz von Fettsäuren zu trocknenden Ölen die Wirksamkeit gegen Buschbohnenrost beeinflusst, wurde Lein- und Tungöl unterschiedliche Menge an Linolsäure zugesetzt (siehe Abbildung 18). Zusätzlich wurde eine Mischung von Lein- und Tungöl getestet. Bei einer protektiven Behandlung (2 Tage vor Inokulation) war die Wirkung des Leinöl-Tungöl-Gemisch deutlich höher als die von Lein- oder Tungöl (Abbildung). Linolsäure selbst zeigte eine

ausreichende Wirkung ab einer Konzentration von 1,875%. Bei 7,5% Linolsäure konnte kein Befall mehr beobachtet werden. In den Mischungen von Linolsäure mit den Ölen zeigte sich ein differenziertes Bild. Bei 0,75% war die Wirkung höher als die der Einzelkomponenten. Bei Konzentrationen konnte dieser Effekt nicht mehr in dieser Deutlichkeit beobachtet werden. Bei 7,5% Linolsäure waren die Mischungen in der Wirkung geringer. Eine signifikante kurative Wirkung (Behandlung zwei Tage nach Inokulation) lag für Linolsäure erst bei 7,5% vor. Lein- und Tungöl zeigten in diesen Versuchen keine kurativen Effekte (Abbildung 18). In Mischungen mit Linolsäure wurde bei 5,625% beobachtet.

Die bereits gute protektive Wirkung der trocknenden Öle wurde nur positive bei geringen Fettsäurezugabe verbessert. Ein Gemisch aus beiden trocknenden Ölen scheint die Wirkung zu stabilisieren. Eine protektive Wirkung kann aber auch durch alleinige Applikation von Linolsäure erreicht werden. Eine kurative Wirkung war in den meisten Fällen nicht gegeben. Nur bei hohen Linolsäurekonzentrationen konnte eine Wirkung beobachtet werden. Eine Wechselwirkung zwischen Fettsäure und Öl scheint aber gegeben.



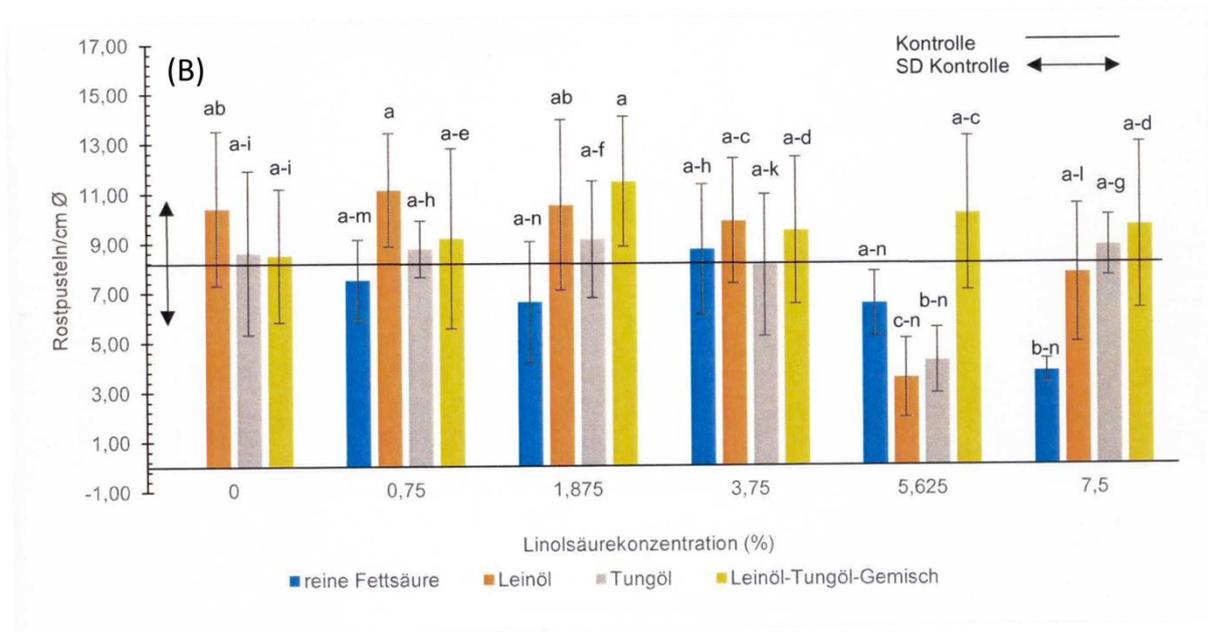


Abbildung 18: Protektive (A) und kurative (B) Wirkung von 2% Lein-, 2% Tungöl sowie einem 1% Lein-1% Tungöl-Gemisch gegenüber *U. appendiculatus* mit Zusatz von Linolsäure. Statistisch signifikante Unterschiede sind durch Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, Tukey-HSD, $p < 0,05$, $n=5$)

Fungizide Wirkung gegenüber Apfelschorf

Die Wirksamkeit der trocknenden Pflanzenöle gegenüber *Venturia inaequalis* an Apfel wurde im Freiland untersucht. Dazu wurden zuvor markierte Zweige mit trocknenden Pflanzenölen (Lein- und Tungöl). Die Behandlung erfolgte nach Schorfwarndienst protektiv. In diesen Praxisorientierten Versuchen zeigte sich, dass bereits eine Ölkonzentration von 2% Lein- bzw. Tungöl eine gute Wirksamkeit (geringere Krankheitsindex, DI) zeigte (siehe Abbildung 19). Die Wirkung von 2% Leinöl war dabei deutlich besser als die von 2% Tungöl. Die Wirkung war vergleichbar mit einem Kupferpräparat (Fungizid, Funguran Progress). Eine erhöhte Konzentration führte zu keiner Verbesserung der Wirkung. Eine Kombination der trocknenden Pflanzenöle mit dem Fungizid führte in allen Fällen zu einer verbesserten Wirkung gegenüber dem Apfelschorf und im Falle von Leinöl wurde der Befall nahezu vollständig unterdrückt.

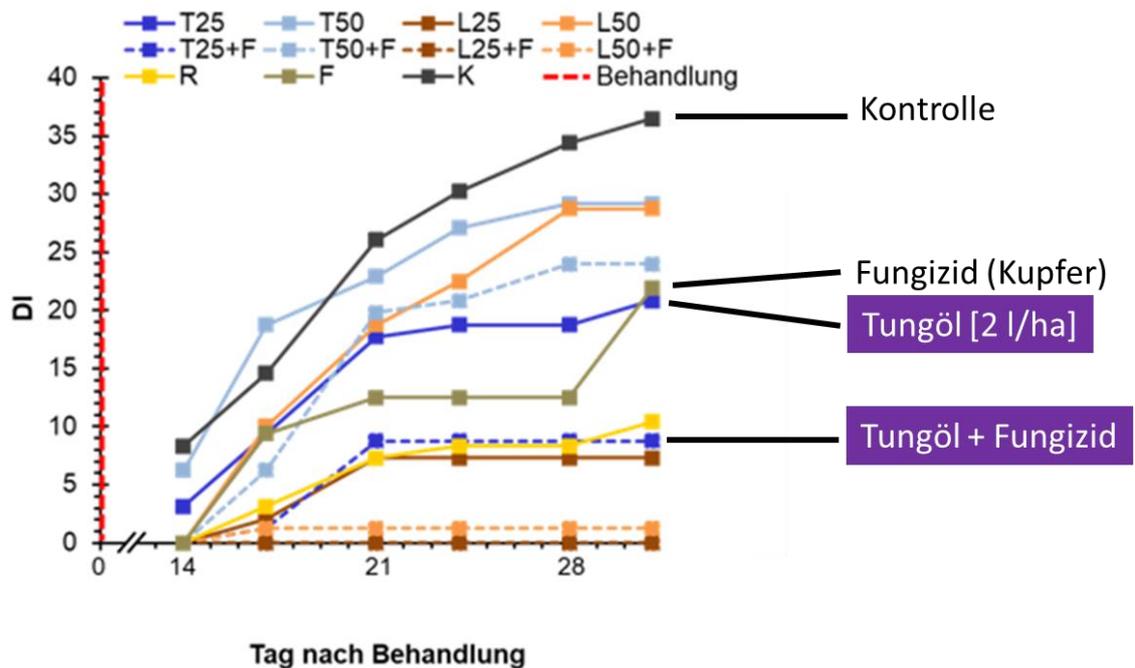


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf des Krankheitsindex (DI) von Apfelschorf nach der Behandlung mit selbsttrocknenden Pflanzenölen (2 l/ha bzw. 4l/ha) im Vergleich zu einem unbehandelten Kontroll- und Fungizid. L = Leinöl, T = Tungöl, R = Rapsölpräparat Micula, F = Funguran Progress (Wirkstoff: Kupfer), 25 = 2% Ölkonzentration, 50 = 4% Ölkonzentration

Fungizide Wirkung gegenüber *Phytophthora infestans*

Bei den Versuchen zur Wirksamkeit gegenüber der Kraut- und Knollenfäule an Kartoffeln im Freiland trat aufgrund der für das Pathogen ungünstige Witterung kein Befall auf. Daher wurden die Versuche zur Wirksamkeit im Gewächshaus an Tomaten durchgeführt (de Haes, 2021). Diese Versuche wurden in gleicher Art durchgeführt, wie sie für Buschbohnen beschrieben sind (Breiing et al., 2021).

Die Untersuchungen an Kartoffeln im Feld schlossen Messungen zu physiologischen Effekten und Ermittlung der Erträge ein. Damit sollte gezeigt werden, ob die trocknenden Öle einen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung auch ohne Pilzbefall haben können. Neben einer unbehandelten Kontrolle wurde dabei der betriebsübliche Integrierte Pflanzenschutz nach guter Landwirtschaftlicher Praxis durchgeführt.

Die relativen Erträge waren 2020 in der Ölbehandlung gleich (Lein: +1%; Raps: -3%) oder etwas höher (Tungöl: +7%) als in der unbehandelten Kontrolle bzw. der betriebsüblichen Fungizidstrategie (siehe Tabelle 2). In den Stärkegehalten gab es keine Unterschiede zwischen

den Varianten. Bei der Kalibrierung zeigten sich Unterschiede in den Behandlungen. Auf eine ausführliche Darstellung soll aber an dieser Stelle verzichtet werden².

Tabelle 2: Relative Ertragsdaten aus dem Kartoffelversuch

Behandlung	Ertrag (%)	Stärkegehalt		Kalibrierung	
		(%)	0-35 (%)	35-55 (%)	> 55 (%)
Unb. Kontr.	100	100	100	100	100
PSM	103	101	106	111	87
Raps	97	100	106	98	93
Tung	107	102	88	115	94
Lein	101	101	90	106	89

Unb. Kontr.: Unbehandelte Kontrolle, PSM: Betriebsüblichen Pflanzenschutzmittelstrategie

Im Versuchsjahr 2019 trat kein Befall mit *P. infestans* auf. Auch gab es keine Unterschiede zwischen den Behandlungen im Ertrag. In 2019 wurden aber Untersuchungen mittels nicht invasiver Messverfahren durchgeführt. Ziel war, Unterschiede innerhalb der Behandlungen zu finden, die auf eine veränderte Reaktionsbereitschaft der Kartoffeln hinweisen können. Bei den Messungen zum Pflanzenwachstum (Pflanzenhöhe, BBCH-Stadien) zeigten sich ebenfalls keine Unterschiede. Die Messungen zum stomatären Widerstand an Pflanzen im Gewächshaus legten nahe, dass dadurch eventuell auch die Temperaturreaktion der Pflanze durch eine veränderte Transpiration beeinflusst werden kann. Dazu wurden Messungen mit einer Thermalkamera durchgeführt. In einer Messkampagne des Forschungszentrum Jülich wurde gesamte Bestand überflogen (siehe Abbildung 20). Aus den Messungen konnte die Oberflächentemperatur der Pflanzen berechnet werden.

Eine Woche nach der Applikation zeigten sich Unterschiede zwischen den trocknenden Ölen (Lein, Tung), dem nicht-trocknenden Rapsöl und der Kontrolle. Die Temperaturen waren zu diesem Zeitpunkt noch unter 20°C (siehe Abbildung 21). Die Spanne der zu messenden Temperaturen war 2°C. Die Temperatur war beim Lein- und Tungöl (unabhängig von der Aufwandmenge) am höchsten und höher als in der Kontrolle. Die Verteilung der gemessenen Temperaturen war aber verschieden. Beim Tungöl waren die Werte über eine kleinere Spanne verteilt als beim Leinöl. In der Grafik ist dies Breite und Höhe der einzelnen Violinplots gut

² Anmerkung: Wegen der Corona-Pandemie konnten 2020 keine ausführlichen Messungen in den Kartoffeln vor

erkennbar. Die niedrigsten Temperaturen konnten beim Rapsöl berechnet werden. Dabei war die Temperatur in der geringeren Aufwandmenge etwas niedriger (2L/ha) als in der höheren (4L/ha). Im späteren Verlauf des sehr heißen Sommers 2019 stiegen die zu messenden Temperaturen im Kartoffelbestand an und erreichten bis 40°C und höher (siehe Abbildung 22). Die Spanne der gemessenen Temperaturen betrug fast 20°C. Zu diesem Zeitpunkt waren keine deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten mehr zu beobachten, obwohl es so scheint, dass die Temperaturen in den Öl-Varianten etwas höher sind als in der Kontrolle. Auffallend waren jedoch die Unterschiede in der Verteilung. Beim Leinöl und der niedrigeren Aufwandmenge beim Tungöl war die Spanne der gemessenen Temperaturen geringer, was in den Violinplots durch die Breite deutlich wird.

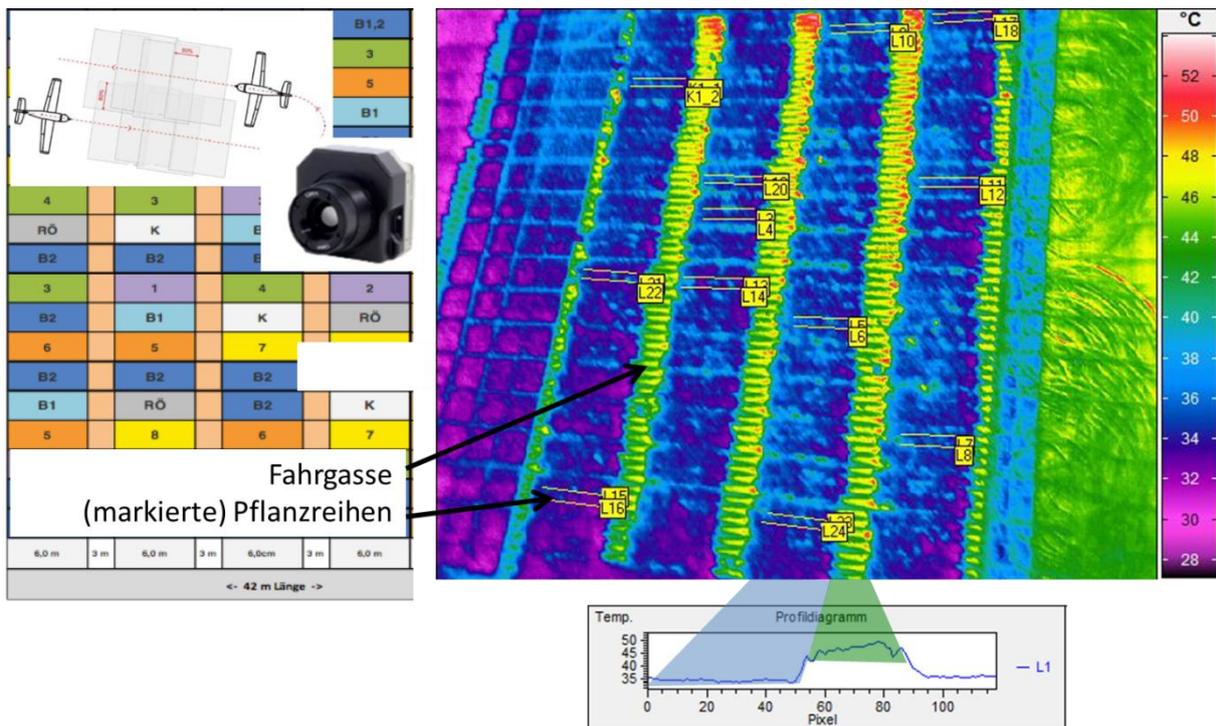


Abbildung 20: Überflüge (links oben) über den Kartoffelbestand in 2019 und Messungen mit einer Thermalkamera (Insert links oben). Der gesamte Bestand wurde erfasst (rechts) und die Thermaldaten für die einzelnen Parzellen daraus ermittelt (rechts unten).

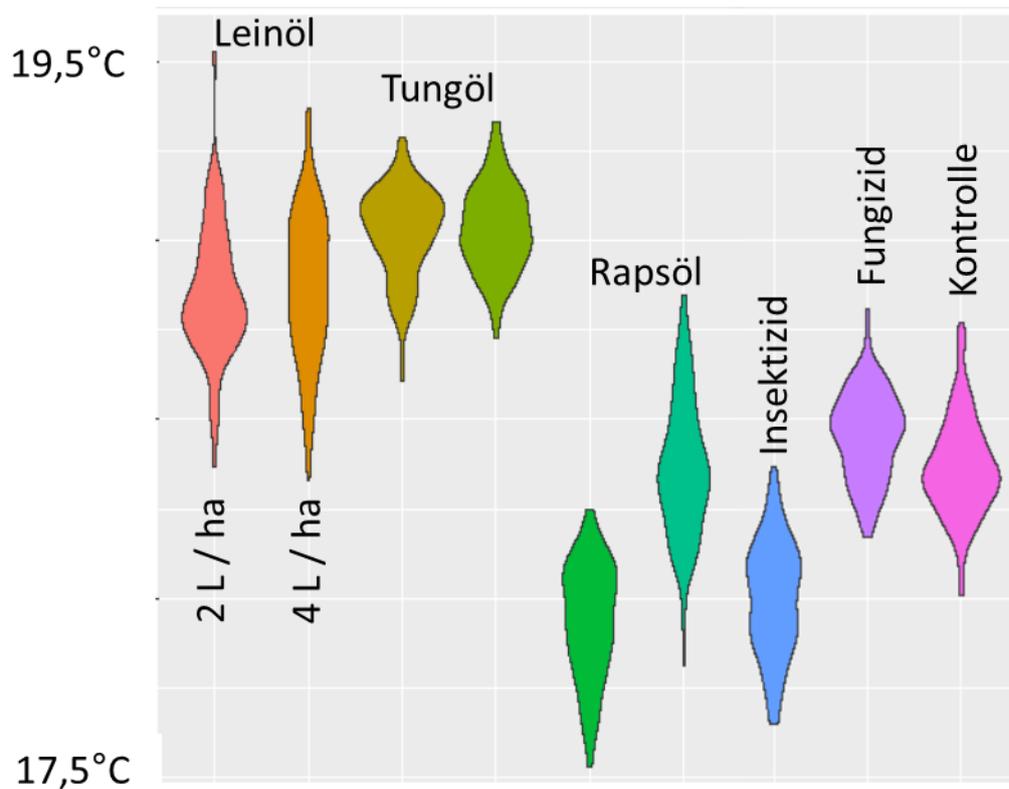


Abbildung 21: Violinplots der berechnete Oberflächentemperatur im Kartoffelbestand 1 Woche nach Applikation der trocknenden Öle (Lein, Tung), des nicht trocknenden Öls (Raps) oder einer betriebsüblichen Insektizid- und Fungizid-Behandlung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Die Öle wurden in zwei Aufwandsmenge (2L und 4L / ha) ausgebracht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Lein- und Tungöl zu physiologischen Veränderungen in Kartoffeln führen können, die anscheinend unabhängig von einem Befall oder der Pflanzenentwicklung sind. Es könnte sein, dass die Filmbildung durch trocknende Öle zu einer veränderten Temperaturregelung führt. In Folge wäre auch eine andere Stressreaktion gegeben.

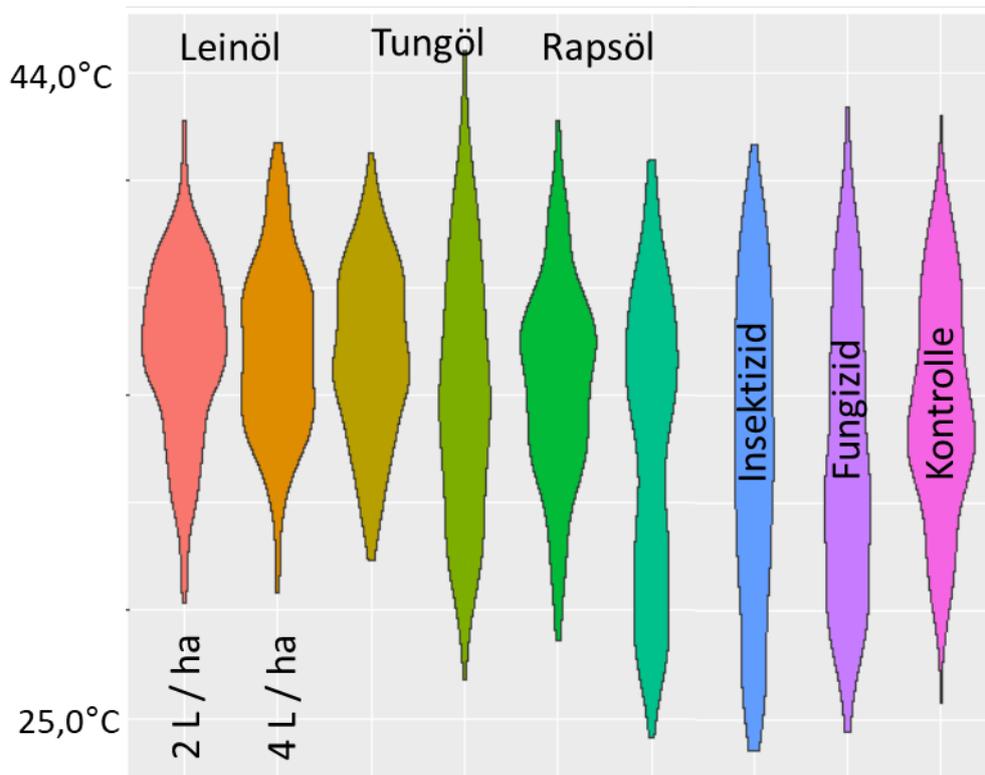


Abbildung 22: Violinplots der berechnete Oberflächentemperatur im Kartoffelbestand nach Applikation der trocknenden Öle (Lein, Tung), des nicht trocknenden Öls (Raps) oder einer betriebsüblichen Insektizid- und Fungizid-Behandlung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Die Öle wurden in zwei Aufwandsmenge (2L und 4L / ha) ausgebracht.

Um die Wirksamkeit gegenüber *P. infestans* zu prüfen, wurden Gewächshausversuche an Tomatenpflanzen im 3-Blattstadium durchgeführt. Hierfür wurde eine Ölkonzentration von 1% gewählt, welche in vorherigen Versuchen zu keiner oder nur sehr geringen phytotoxischen Wirkungen geführt hatte. Die Durchführung der Versuche orientierte sich an den Versuchen zu Buschbohne (Breiing et al., 2021). Im Pathosystem Tomate und *Phytophthora infestans* lag eine sehr gute protektive Wirkung von 1% Lein- und 1% Tungöl der behandelten Blätter bis fünf Tage vor Inokulation vor (siehe Abbildung 23). Die Wirksamkeit lag bei Leinöl über 80%, bei Tungöl variierte diese zwischen 50 bis 80%. Allerdings war keine kurative Wirkung zu beobachten, wie dies bei Buschbohnen beobachtet werden konnte.

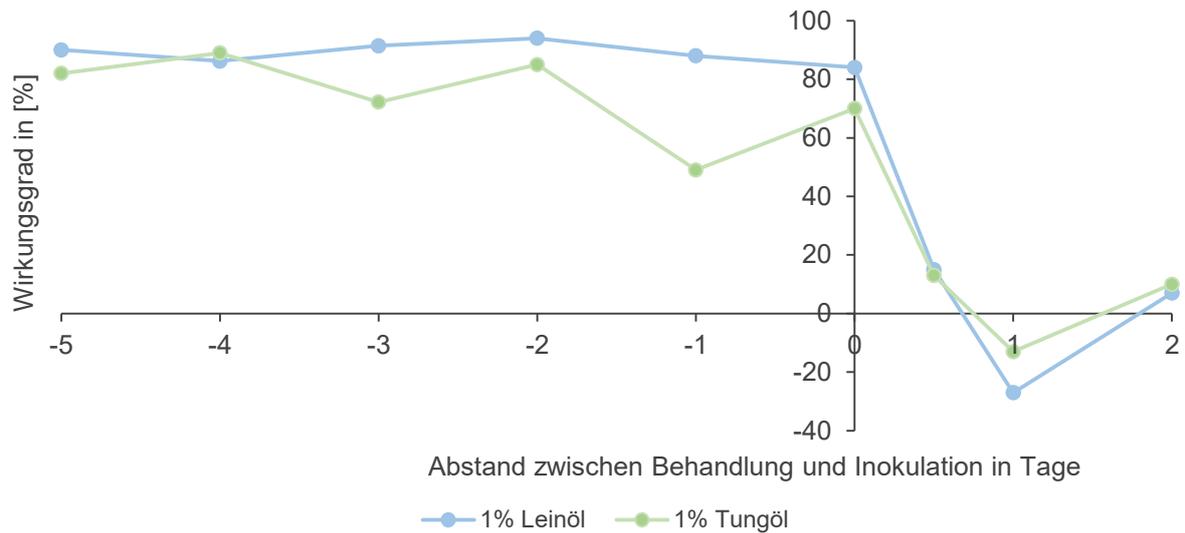


Abbildung 23: Wirksamkeit einer Behandlung mit 1% Tungöl oder Leinöl gegenüber dem Befall mit *P. infestans* an Tomaten cv. Moneymaker, (n=8), Bonitur erfolgte fünf Tage nach der Inokulation, Behandlung fand zwischen fünf Tage vor (protektiv) bis zwei Tage nach (kurativ) der Inokulation statt. Aus: MSc-Arbeit Paula de Haes (2021)

In Versuchen zur systemischen Wirkung wurden bei Tomaten im 3-Blattstadium nur das zweit- und drittälteste Blatt behandelt, während das jüngste (Blatttage 1) nicht behandelt wurde. Hier konnte bereits bei einer Leinölkonzentration von 0,5% eine gute systemische Wirkung gegenüber *Phytophthora infestans* beobachtet werden (siehe Abbildung 24). Die Wirkung von Tungöl war schwächer ausgeprägt aber vorhanden (siehe Abbildung 25). Die Wirksamkeit beider trocknenden Öle war gut. Es konnte im Gegensatz zu Buschbohnen auch eine sehr schwach ausgeprägte Dosis-Wirkungsbeziehung beobachtet werden. Da die Behandlung ab einer Konzentration von 0,75% aber auch zu kleineren Nekrosen führte, kann nicht ganz ausgeschlossen werden, dass der Effekt auf einer Kombination Öl und Pflanzenreaktion beruht und die bessere Wirkung durch diesen zusätzlichen Effekt verursacht wird. Hierbei könnte es sich auch um eine Form der Induzierten Resistenz handeln, wie sie von Cohen et al. bereits 1991 für bestimmte Fettsäuren (Arachidonsäure) gezeigt wurde.

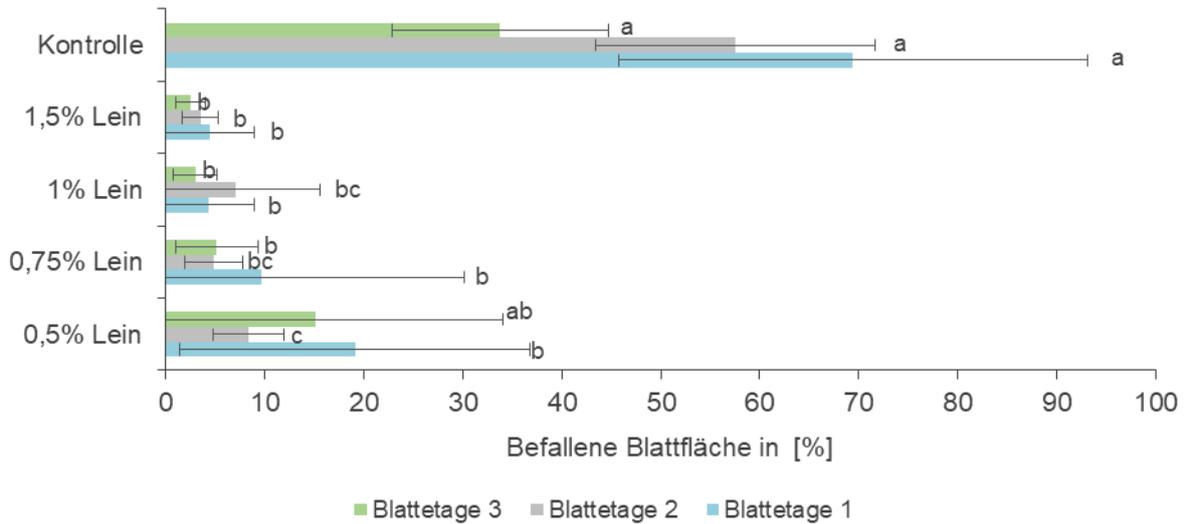


Abbildung 24: Einfluss einer protektiven Applikation (-24h vor Inokulation, behandelt wurden Blatttage 2 und 3) verschiedener Konzentrationen Leinöl auf den Blattbefall von Tomaten cv. Moneymaker mit *P. infestans* fünf Tage nach der Inokulation, (n=8), Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Blatttage unterscheiden sich signifikant nach Games-Howell ($\alpha = 0,05$); aus MSc-Arbeit von Paula de Haes (2021).

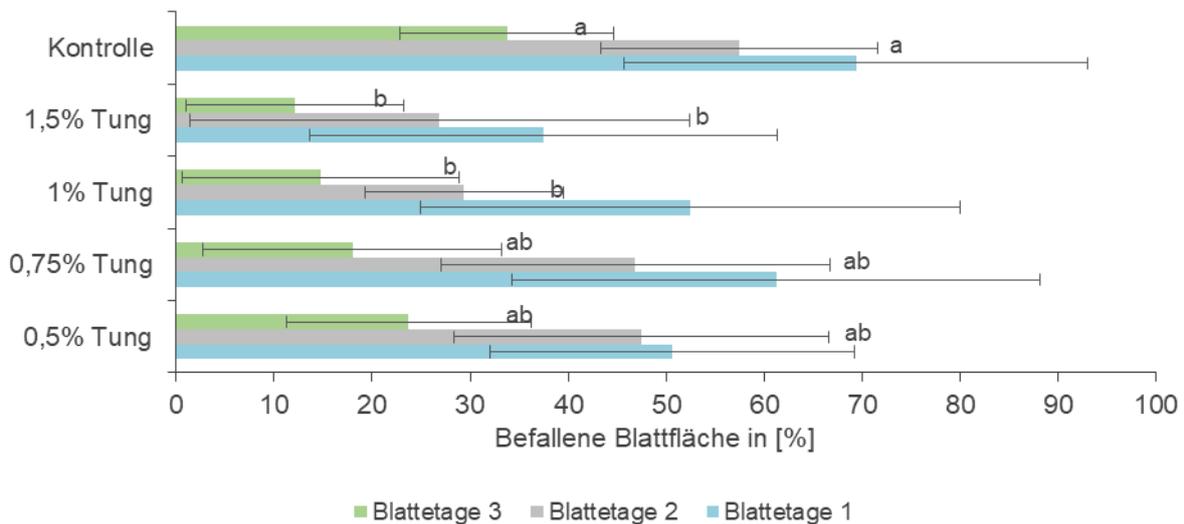


Abbildung 25: Einfluss einer protektiven Applikation (-24h vor Inokulation, behandelt wurden Blatttage 2 und 3) verschiedener Konzentrationen Tungöl auf den Blattbefall von Tomaten cv. Moneymaker mit *P. infestans* fünf Tage nach der Inokulation, (n=8), Säulen mit verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Blatttage unterscheiden sich signifikant nach Games-Howell ($\alpha = 0,05$); aus MSc-Arbeit von Paula de Haes (2021).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in drei untersuchten Wirt-Parasit-Interaktionen

- Buschbohne – *U. appendiculatus* (Gewächshaus)
- Apfel – *V. inaequalis* (Freiland, Gewächshaus)
- Tomate (Kartoffel) – *P. infestans* (Gewächshaus)

die Applikation von Lein- und Tungöl zu einem wirksamen Schutz der Pflanzen vor diesen Pathogenen führt. Dennoch bleibt es notwendig die Wirksamkeit auch in anderen Pathosystemen zu zeigen. Insbesondere sind weitere Freilandversuche unter Praxisbedingungen notwendig.

Insektizide Wirkung gegenüber der Schwarzen Bohnenlaus (*Aphis fabae*)

Die insektizide Wirkung von Leinöl gegenüber Blattläusen wurde bereits gezeigt (Brendel, 2013). In diesen Versuchen stand daher im Vordergrund, ob diese Wirkung auch mit dem neuen Herstellungsverfahren (Breiing et al., 2021) und für Tungöl nachweisbar ist. Dazu wurden in vitro Versuche am System Schwarze Bohnenlaus (*Aphis fabae*) und Bohne durchgeführt. Blattläuse (7-8 Tage Adulte) wurde dafür auf zuvor behandelte Blätter (protektiv) gesetzt oder nach dem Aufsetzen auf die Blätter kurativ mit den Pflanzenölen besprüht. 24 und 48 Stunden nach Aufsetzen der Läuse wurde die Anzahl der neugeborenen Nymphen als Maß für die Blattlausentwicklung auf dem Blatt ausgezählt. 24 Stunden nach Aufsetzen der Blattläuse war die kurative Wirkung – Blattläuse aufsetzen, dann besprühen – bei allen Ölen wie erwartet gegeben und statistisch signifikant (siehe Abbildung 26). Die größte Wirkung lag bei der Kombination von Lein- und Tungöl vor. Auch eine protektive Wirkung – Blätter besprühen, dann Läuse aufsetzen – war vorhanden, jedoch war sie bis auf Tungöl schwächer ausgeprägt als die kurative Wirkung (siehe Abbildung 26). Ob hier ein deterrenter Effekt des Ölfilmbelags eine Rolle spielt, konnte in diesen Versuchen nicht eindeutig geklärt werden. Dazu hätten Wahlversuche mit den Läusen eine Aussage erlaubt. Es bleibt aber die Vermutung, dass der mikroskopisch beschriebene Belag auch in die Erkennung bei Blattläusen eingreifen könnte. Das ließe auch die bessere Wirkung von Tungöl besser erklären. Wie gezeigt maskiert der Tungölfilm die Pflanzenoberfläche und könnte auch in diesem Fall das Insektenverhalten beeinflussen.

Auch 48 Stunden nach Aufsetzen war die zuvor beobachtete kurative und protektive Wirkung vorhanden, wenn auch in abgeschwächter Form (siehe Abbildung 27). Eine signifikante

protektive Wirkung war noch bei Raps- und Tungöl zu beobachten. Mit diesen Versuchen konnte die zuvor schon beschriebene Wirkung auf Läuse bestätigt werden. Es scheint sogar eine gewisse protektive Wirkung vorhanden zu sein, die auf eine Wirkung des Ölfilms auf der Pflanze beruhen könnte.

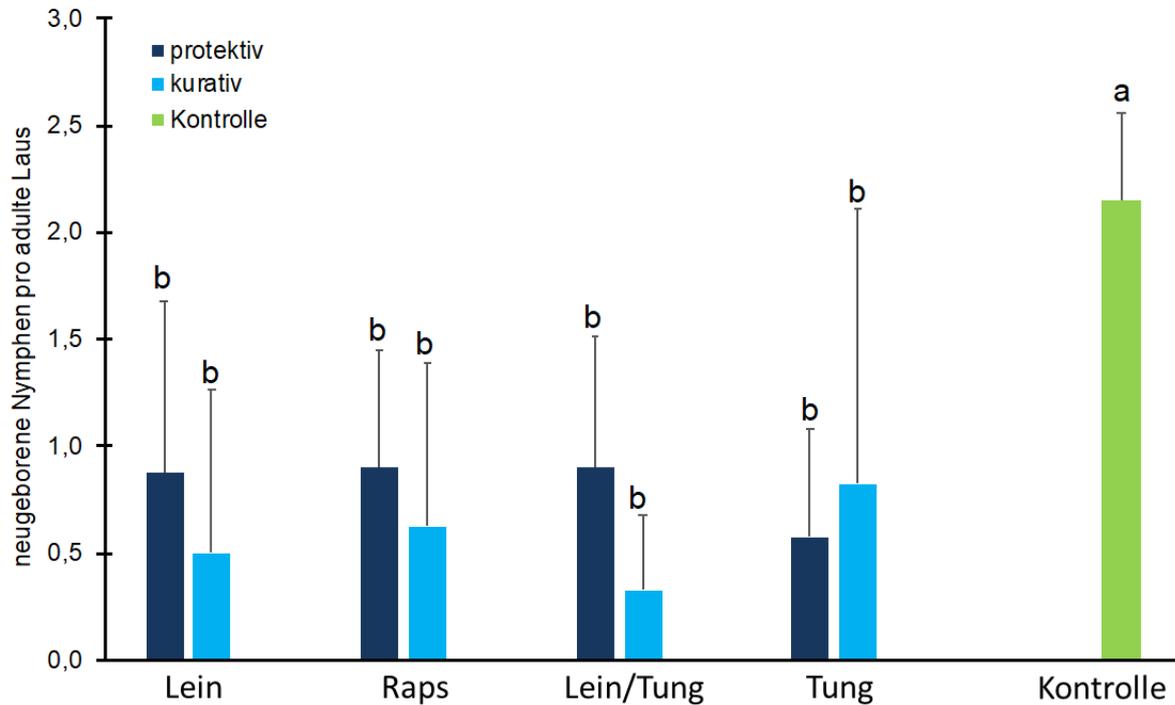


Abbildung 26: Protektive und kurative insektizide Wirkung von 2%Lein-, Raps- und Tungöl auf die Anzahl neugeborener Nymphen pro adulte *A. fabae* 24 Stunden nach Aufsetzen der adulten Läuse.

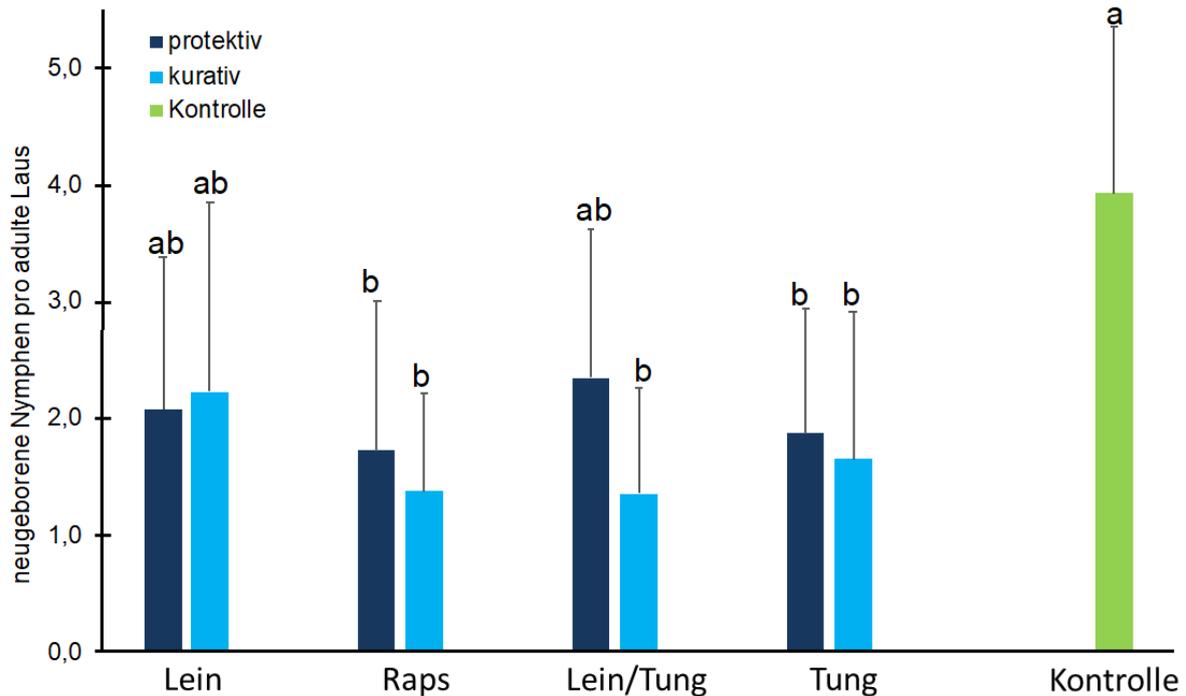


Abbildung 27: Protektive und kurative insektizide Wirkung von 2%Lein-, Raps- und Tungöl auf die Anzahl neugeborener Nymphen pro adulte *A. fabae* 48 Stunden nach Aufsetzen der adulten Läuse.

Insektizide Wirkung gegenüber dem Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*)

Die Wirkung gegenüber dem Kartoffelkäfer wurde *in vitro* untersucht. Dazu wurden Kartoffelblätter in einer feuchten Schale gelegt auf die dann entweder Larven oder adulte Kartoffelkäfer gesetzt wurden. Für die protektive Behandlung wurden Kartoffelblätter aus dem Freiland verwendet, die zwei Tage zuvor mit den Ölen behandelt wurden. Für die kurative Wirkung wurden frische Kartoffelblätter aus dem Freiland genommen und die Käfer nach dem Aufsetzen einmalig mit den Ölen besprüht. Täglich wurden die Blätter gewechselt, um eine ausreichende Nahrungsquelle anzubieten. Pro Schale wurden 20 Individuen verwendet und vierfach wiederholt. Der Beobachtungszeitraum war bei den Larven drei, bei den Adulten sechs Tage. Die Ölkonzentration betrug 2%.

Die protektive Wirkung gegenüber Larven und Adulten war gering (siehe Abbildung 28). Eine 20%ige protektive Wirkung gegenüber Larven konnte nur bei Rapsöl ab Tag 2 nach Aufsetzen der Larven (siehe Abbildung 28) beobachtet werden. Sowohl Lein- als auch Tungöl hatten keine Wirkung im Vergleich zur Kontrolle. Bei Adulten setzte die Wirkung erst nach drei Tagen en.

Am Tag 6 lag die Wirkung von Tungöl bei etwa 25% und von Rapsöl bei 30%. Leinöl hatte keine Wirkung. Eine kurative Wirkung konnte für alle drei Öle nachgewiesen werden. Sie lag bei Larven zwischen 25% und 35% (siehe Abbildung). Tungöl zeigte den höchsten Anteil toter Larven (siehe Abbildung). Die Wirkung gegen Adulte von *L. decemlineata* war deutlicher und erreichte bei Tungöl 50% nach sechs Tagen (siehe Abbildung 28). Auch Raps- und Leinöl zeigten eine Wirkung, die für Leinöl am schwächsten ausgeprägt war.

Es kann festgehalten werden, dass alle drei Öle eine kurative Wirkung haben, die für das trocknende Tungöl am stärksten ausgeprägt war. Eine protektive war demgegenüber nur schwach wenn überhaupt vorhanden.

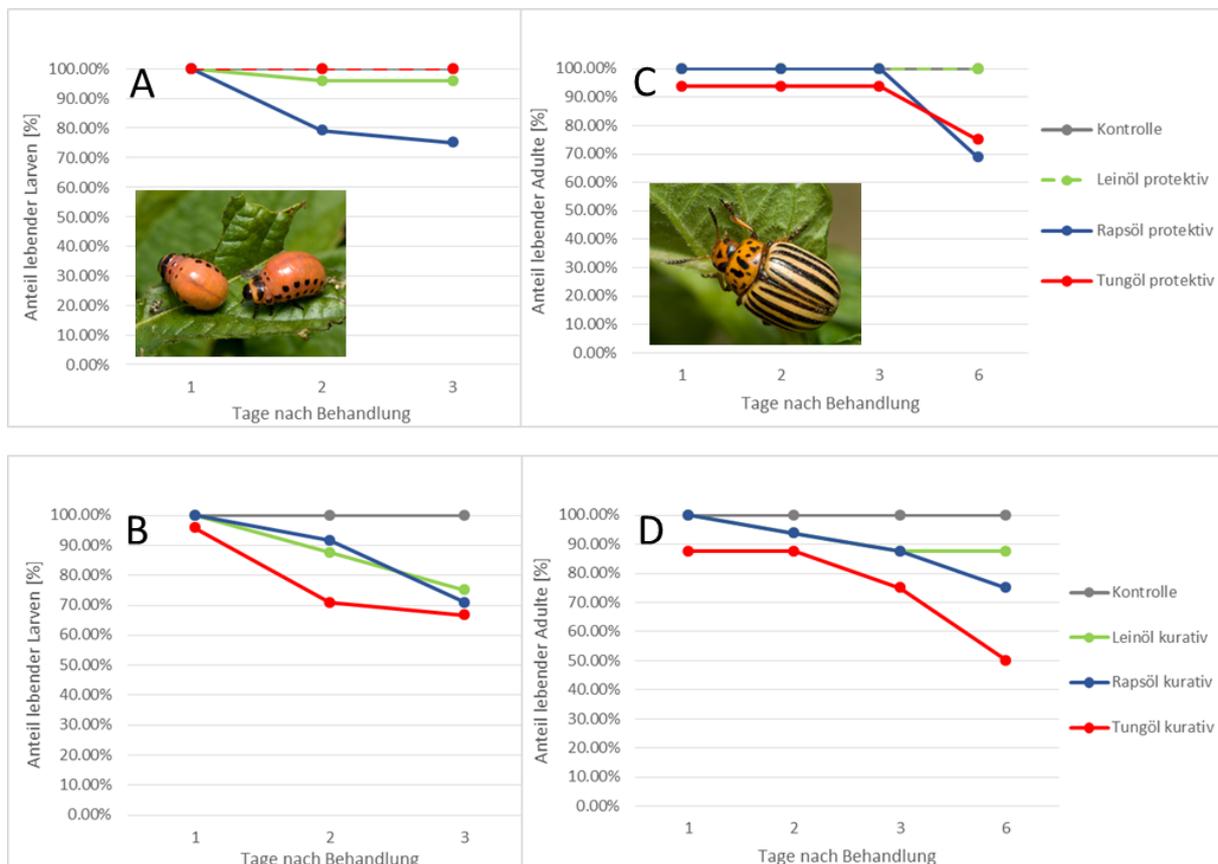


Abbildung 28: In vitro protektive (A, C) und kurative (B, D) Wirksamkeit von 2% Lein-, Tung- und Raps gegenüber Larven (A, B) und Adulte (C, D) des Kartoffelkäfers (*L. decemlineata*) nach Aufsetzen (Tage nach Behandlung) auf Kartoffelblätter im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle.

Wirkung bei Zusatz von Fettsäuren

Die insektizide Wirkung gegenüber *A. fabae* konnte für trocknende Öle (Lein, Tung) als auch für das nicht-trocknenden Rapsöl beobachtet werden. Um zu klären, welche Bedeutung die

Fettsäuren bei dieser Wirkung haben, wurden dem Lein- und Tungöl Linolsäure (18:2 Fettsäure, Hauptbestandteil im Rapsöl) und Linolensäure (18:3 Fettsäure, Hauptbestandteil im Leinöl) zugesetzt. Die Fettsäuren wurden nach dem gleichen Herstellungsverfahren wie die trocknenden Öle hergestellt (Breiing et al., 2021). In einem *in vitro* Test wurden dazu adulte Blattläuse auf Bohnenblätter gesetzt und anschließend einmalig behandelt. Die Reproduktionsrate pro Laus wurde 24 und 48 Stunden nach Applikation ausgewertet und der Wirkungsgrad nach ABBOTT (1925) berechnet. In diesen Versuchen zeigte Leinöl einen Wirkungsgrad über 60% und Tungöl von etwa 50% (siehe Tabelle 3). Der Zusatz von 0,75% Linol- oder 0,25% Linolensäure verbesserte die Wirksamkeit bei Ölen deutlich. Die höchsten Wirkungsgrade wurden nach 48 Stunden gemessen. Auffällig war hierbei, dass der Zusatz der Linolsäure beim Leinöl und Linolensäure beim Tungöl die höchste Wirkung zeigte.

In diesen Versuchen konnte gezeigt werden, dass die insektizide Wirkung von Pflanzenölen durch einen Zusatz von Fettsäuren verbessert werden kann. Die Wirkverbesserung war bei Leinöl durch Zusatz von Linolsäure besser, also der Fettsäure, die nicht im Leinöl in größerer Menge vorkommt. Beim Tungöl war es Linolensäure, eine 18:3 Fettsäure, die nicht im Öl vorkommt. Der Zusatz der 18:2-Fettsäure (Linolsäure) verbesserte die Wirkung, der Wirkungsgrad war aber geringer als bei der 18:3-Fettsäure

Tabelle 3: Kurative Wirkung trocknender Pflanzenöle alleine oder mit Zusatz von Fettsäuren (Linolsäure, Linolensäure) auf die Reproduktionsrate von *A. fabae* 24 und 48 Stunden nach Behandlung in einem *in vitro* Test

Behandlung	24 Stunden		48 Stunden	
	R-Rate	Wirkung (%)	R-Rate	Wirkung (%)
Kontrolle	2,0	-	2,87	-
2% Leinöl	0,78	61	0,78	73
+0,75% Linolsäure	0,30	85	0,23	92
+0,25% Linolensäure	0,45	77	0,40	86
2% Tungöl	0,97	51	1,47	49
+0,75% Linolsäure	0,68	66	0,78	73
+0,25% Linolensäure	0,57	71	0,30	90

Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass trocknende Pflanzenöle aus Lein oder dem Tungölbaum eine gute fungizide und insektizide Wirkung haben. Durch ihre geringe Toxizität und gute biologische Abbaubarkeit wären sie daher eine geeignete Alternative zu chemischen Pflanzenschutzmitteln, die auch im Organischen Anbau anwendbar wären. Die protektive fungizide Wirkung reicht bis zu sechs Tage nach der Applikation. Dies erlaubt eine zielgerichtete Anwendung im Rahmen des Integrierten Pflanzenschutzes und bei Anwendung von entsprechenden Prognoseverfahren und Warndiensten, wie sie bei Apfelschorf oder der Kraut- und Knollenfäule üblich sind. Durch ihre günstigen ökologischen und biologischen Eigenschaften wäre auch eine mehrmalige Anwendung möglich, ohne dass eine Anreicherung von Rückständen zu befürchten wäre.

Zudem zeigten die trocknenden Öle eine kurative insektizide Wirkung, welche durch den Zusatz von Fettsäure sogar gesteigert werden konnte. Ob diese Wirkung ausreicht um einen effektiven Schutz im Freiland gewähren zu können, konnte in diesen Versuchen aber nicht gezeigt werden. Dennoch scheint es möglich wie Versuche von Brendel (2013) bereits zeigten.

Gerade die gleichzeitige fungizide und insektizide Wirkung lassen trocknende Öle für einen nachhaltigen Pflanzenschutz attraktiv erscheinen, weil mit einer Anwendung zwei Ziele verfolgt werden könnten. Die schnelle oxidative Trocknung an der Luft würde sogar eine Anwendung bei ungünstigeren Witterungsbedingungen ermöglichen, da der Film auf Oberflächen stabil gegen Abwaschen erscheint.

Neben dieser Wirkung gegen biotische Stressfaktoren, scheint sogar eine Wirkung bei abiotischen Stress denkbar. Die Öle, aber insbesondere auch die mehrfach ungesättigten Fettsäuren, scheinen einen direkten Einfluss auf die Pflanze zu haben. So wäre denkbar, dass eine positive pflanzenstärkende Wirkung (wie eine Induzierte Resistenz) möglich ist, aber auch eine provozierte phytotoxische Wirkung. Hierbei wird deutlich, welche Potenziale aber auch welche Herausforderungen die trocknenden Pflanzenöle in der Pflanzenproduktion haben. Die Kombination des Ölkörpers (Lein- oder Tungöl) mit entsprechenden Fettsäuren bedingt die Wirkung in die eine oder andere Richtung. So konnte gezeigt werden, dass ein Zusatz von Linol- oder Linolensäure die insektizide Wirkung der Öle verstärken kann. Gleichzeitig führen höhere Fettsäureanteile aber auch zu verstärkten Stressreaktionen der Pflanze selbst. Aber auch dieser

Effekt könnte genutzt werden. Wie die Versuche an Tomaten zeigten, scheinen die durch die Behandlung ausgelösten kleinen Nekrosen eine systemische Wirkung gegen *P. infestans* zu fördern.

Es liegt also eine komplexe Wechselwirkung zwischen Ölkonzentration, Fettsäurezusammensetzung, der Pflanzenart sowie deren Entwicklungsstadium und der Umwelt mit möglichen abiotischen und biotischen Stressfaktoren vor. Ein grundlegendes Verständnis dieser Interaktionen kann genutzt werden, um trocknende Öle zielgerichtet in einer nachhaltigen Pflanzenproduktion einsetzen zu können. Das in diesem Projekt genutzte Herstellungsverfahren macht es möglich, die verschiedenen Öle und Fettsäuren miteinander unabhängig kombinieren zu können. Auch eine Mischung mit anderen Produkten war möglich, sodass dies eine Art Baukastenprinzip darstellt, den man nach Art der Anwendung anpassen kann ohne die Formulierung anpassen zu müssen.

Literatur

- Alam, M., Akram, D., Sharmin, E., Zafar, F., Ahmad, S. (2013). Vegetable oil based eco-friendly coating materials: A review article. Arab. J. Chem., 7, 469-479.
- Abbott, W.S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. J. Econ. Entomol., 18, 265–267.
- BLE (2013). Nationaler Aktionsplan zur Nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: Bonn, Germany,
https://www.nappflanzenschutz.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Startseite/NAP_2013-2_002_.pdf
- Brendel, E. (2013). Alternative Bekämpfungsstrategien gegen die Kleine Weiße Rosenschildlaus *Aulacaspis rosae* (Bouché) (Hemiptera: Diaspididae) an Schnittrosen unter Glas mittels des Einsatzes von Leinöl. Gesunde Pflanzen, 65, 73–77.
- Bresinsky, A., Körner, C., Kadereit, J.W., Neuhaus, G., Sonnwald, U. (2008): Lehrbuch der Botanik (Strasburger). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 36. Auflage.
- Burchard, P., Bilger, W., & Weissenbock, G. (2000). Contribution of hydroxycinnamates and flavonoids to epidermal shielding of UV-A and UV-B radiation in developing rye primary leaves as assessed by ultraviolet-induced chlorophyll fluorescence measurements. Plant, Cell and Environment, 23(12), 1373–1380
- BVL – Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2015). Zugelassene Pflanzenschutzmittel. Auswahl für den ökologischen Landbau nach der Verordnung (EG) Nr. 834/2007. Stand: Oktober 2015.
http://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/psm_oekoliste-DE.pdf
- Clayton, E.E.; Smith, T.E.; Shaw, K.J.; Gaines, J.G.; Graham, T.W.; Yeager, C.C. (1943). Fungicidal tests on blue mold (*Peronospora tabacina*) of tobacco. J. Agric. Res., 66, 261–276.
- Cohen, Y., Gisi, U., Mosinger, E. (1991). Systemic resistance of potato plants against *Phytophthora infestans* induced by unsaturated fatty acids. Physiological and Molecular Plant Pathology, 38, 255-263.
- De Haes, P. (2021). Wirkmechanismen von trocknenden Pflanzenölen gegenüber *Phytophthora infestans*. Msc-Arbeit Universität Bonn unter der Betreuung von Steiner, U. und Kraska, T. (unveröffentlichte Prüfungsleistung)
- Derksen, J.T.P.; Cuperus, F.P.; Kolster, P. (1995). Paints and coatings from renewable resources. Ind. Crops Prod., 3, 225–236.
- De Souza Franco, E.; de Aquino, C.M.F.; de Medeiros, P.L.; Evêncio, L.B.; da Silva Góes, A.J.; de Souza Maia, M.B. (2012). Effect of a Semisolid Formulation of *Linum usitatissimum* L. (Linseed) Oil on the Repair of Skin Wounds. Evid. Based Complement. Altern. Med., 2012.

Firestone, D. (2013). Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes, 3rd ed.; AOCS Press: Urbana, IL, USA, ISBN 9780983079194

Förschler, A., Schmitz-Eiberger, M., Noga, G. (2002): Minderung von UV-B induzierten Pflanzenschäden bei gartenbaulichen Nutzpflanzen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn. Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 95, 54 Seiten.

Gerlach, W.W.P. (1993). Echter Mehltau – Alternative Bekämpfung. Gartenbauwissenschaft, 30, 1390-1392.

Hillmer, J. (2018). Einfluss von selbsttrocknenden Pflanzenölen auf *Uromyces appendiculatus*. Msc-Arbeit Universität Bonn unter der Betreuung von Kraska, T. und Steiner, U. (unveröffentlichte Prüfungsleistung)

Ibrahim, E.A., Ramadan, W.A. (2015). Effect of zinc foliar spray alone and combined with humic acid or/and chitosan on growth, nutrient elements content and yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants sown at different dates. *Scientia Horticulturae*, 184, 101-105.

Jacobsen, M., Crystal, M.M., Warthen, J.D. (1981). Boll Weevil Feeding Deterrents from Tung Oil. *J. Agric. Food Chem.*, 29, 591-593.

Lin, T.-K.; Zhong, L.; Santiago, J.L. (2017). Anti-Inflammatory and Skin Barrier Repair Effects of Topical Application of Some Plant Oils. *Int. J. Mol. Sci.*, 19, 1–21.

Lligadas, G., Ronda, J.C., Galià, M., Cádiz, V. (2013): Renewable polymeric materials from vegetable oils: a perspective. *Materials Today*, 16(9), 337-343.

Mendgen, K. (1978). Der Infektionsverlauf von *Uromyces phaseoli* bei anfälligen und resistenten Bohnensorten. *Phytopathologische Zeitschrift*, 93, 295–313.

Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkumova, O.B., Rakitin, V.Y. (1999). , Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106, 135-141.

Petcu, E., Schitea, M., Cirstea, V.E. (2009): The effect of water stress on cuticular transpiration and its association with alfalfa yield. *Romanian Agricultural Research*, 26, 53-56.

Petry, M.; Pude, R.; Kraska, T. (2017). Verfahren zur Herstellung eines Pflanzenbehandlungsmittels und Verfahren zur Behandlung von Pflanzen. DE102017000110A1; EP3568014A1. 1 October 2017.

Miao, S.; Wang, P.; Su, Z.; Zhang, S. (2014). Vegetable-oil-based polymers as future polymeric biomaterials. *Acta Biomater.*, 10, 1692–1704.

Richter, E., Scharf, M., Herbener, M. (2010). Falscher Mehltau (*Bremia lactucae*) an Salat (*Lactuca sativa*) – Welches Potenzial haben Pflanzenstärkungsmittel? *Journal für Kulturpflanzen*, 62(8), 287-298.

Roth, L.; Kormann, K. (2005). Atlas of Oil Plants and Vegetable Oils, 1st ed.; AgriMedia: Bergen/Dumme, Germany, ISBN 9783862630196.

Rouse, J.W., Haas, R., Schell, J.A., Deering, D.W., Harla, J.C. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT Type III Final Report, Greenbelt, MD, USA.

Suresh, S.K.; Suresh, P.V.; Kudre, T.G. (2019). 4—Prospective ecofuel feedstocks for sustainable production. In *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, 1st ed.; Azad, K., Ed.; Woodhead Publishing Series in Energy; Woodhead Publishing–Elsevier: Duxford, UK; Cambridge, UK, pp. 89–117. ISBN 9780081027776.

Yang, X., Zhang, S., Li, W. (2015): The performance of biodegradable tung oil coatings. *Progress in Organic Coatings*, 85, 216-220.

Yeats, T.H., Rose, J.K.C. (2013): The Formation and Function of Plant Cuticles. *Plant Physiology*, 163(1), 5-20.

Zarco-Tejada, P.J., Berjón, A., López-Lozano, R., Miller, J.R., Martín, P., Cachorro, V., González, M.R., de Frutos, A. (2005). Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 99, 271-287.

Zeissler, V.V. (2013): Die pflanzliche Kutikula – Aufbau, Funktion und epiphyller Lebensraum. Diss. Univ. Bonn. Online verfügbar: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2013/3441/3441.pdf>.

Liste der Veröffentlichungen und Präsentationen

Breiing, V., Hillmer, J., Schmidt, C., Petry, M., Behrends, B., Steiner, U., **Kraska, T.**, Pude, R. (2021). Fungicidal Efficacy of Drying Plant Oils in Green Beans Against Bean Rust (*Uromyces appendiculatus*). *Plants*, 10(1), 143. <https://doi.org/10.3390/plants10010143>

Die Veröffentlichung ist Bestandteil des Projektberichts. Verweise, Auszüge, Abbildungen und Tabellen aus dieser Veröffentlichung werden im Text zitiert als Breiing et al., 2021

Breiing, V., Petry, M., Pude, R., Kraska, T. (2021). Self-drying plant oils in plant protection. 4th International Symposium on Horticulture in Europe. 8-11 March 2021. <https://she-ihs-fav2020.de/>

Breiing, V., Boenigk, T., Kraska, T., Pude, R. (2019). Efficacy of self-drying plant oils against potato beetle. IX. Symposium on Plant Protection and Health in Europe, 19.-20. November 2019 Julius Kühn-Institut, Braunschweig, Germany.

Breiing, V., Kraska, T., Pude, R. (2019). Wirkung von selbsttrocknenden Pflanzenölen gegenüber abiotischen und biotischen Schadfaktoren. 53. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung, Berlin, Germany.

Breiing, V., Kraska, T., Pude, R. (2018). Einfluss selbsttrocknender Pflanzenöle im Pflanzenschutz. Poster-Nr. 068, Sektion Pflanzenschutz im ökologischen Landbau, 61. Deutsche Pflanzenschutztagung, 11.-14. September 2018, Universität Hohenheim, Germany. Julius-Kühn-Archiv, 461, Seite 470.

Breiing, V., Kraska, T., Pude, R. (2017). Effects of self-drying plant oils in biological plant protection. VIII. Symposium on Plant Protection and Health in Europe, 13.-14. December 2017 Julius Kühn-Institut, Braunschweig, Germany.

Kurzfassung

Die Reduktion von chemischen Pflanzenschutzmitteln ist ein primäres gesellschaftliches Ziel und im „Nationalen Aktionsplan zur Nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln“ Deutschlands festgeschrieben (BLE, 2013). Alternative Pflanzenschutzmitteln und -verfahren müssen daher nicht nur umweltfreundliche sein. Sie müssen eine geringe Öko- und Humantoxikologie aufweisen und möglichst auch biologisch abbaubar sein. Pflanzenöle würden die Anforderungen genügen und sind als Stoffe mit niedrigem Risiko auch im Ökologischen Anbau einsetzbar. Für die aus Lein (*Linum usitatissimum*) und Tungölbaum (Holzölbaum, Tungbaum, *Vernicia fordii*) gewonnen trocknenden (selbsttrocknende) glyceridischen Pflanzenöle wurde bereits gezeigt, dass sie fungizide und insektizide Wirkung haben. Dennoch werden trocknende Pflanzenöle wenig im praktischen Pflanzenschutz eingesetzt.

Für die nach einem patentierten Verfahren hergestellten trocknenden Lein- und Tungöl konnte gezeigt werden, dass eine gute protektive fungizide Wirkung gegen Bohnenrost (*Uromyces appendiculatus*), Apfelschorf (*Venturia inaequalis*) und Krautfäule (*Phytophthora infestans*) an Tomaten bis zu 6 Tagen vor der Inokulation mit den Pathogenen gegeben ist. Die fungizide kurative Wirkung ist dagegen deutlicher schlechter und maximal vier Tage nach Befall vorhanden. Die Wirkung ist dabei über einen Bereich unabhängig von der Konzentration. Während eine systemische Wirkung bei Tomaten nachweisbar war, war diese in Buschbohnen nicht vorhanden. Unterschiede in der Wirkung zwischen Lein- und Tungöl scheinen abhängig von der Art der Filmbildung zu sein.

Es konnte eine kurative insektizide Wirkung gegen die Schwarze Bohnenlaus (*Aphis fabae*) und dem Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*) gezeigt werden. Eine protektive Wirkung war dagegen deutlich schwächer. Der Zusatz von Linol- oder Linolensäure konnte die insektizide Wirkung steigern.

Die trocknenden Pflanzenöle können die Reaktion von Pflanzen gegenüber abiotische Faktoren wie UV-Stress oder Trockenstress beeinflussen. Eine direkte Wirkung auf die Pflanze ist gegeben. In Abhängigkeit von der Pflanzenart und dem Entwicklungsstadium traten ab einer höheren Konzentration phytotoxische Nebenwirkungen auf. Unterhalb dieser Schwelle konnten physiologische Wirkungen – gemessen anhand von Vegetationsindices – nachgewiesen, welche maßgeblich durch die Fettsäure im Öl determiniert werden.

Executive Summary

A reduction of chemical plant protection is a major scientific goal and defined by the “National action plan for a sustainable application of plant protection products” of Germany (BLE 2013). Alternative plant protection measures have to be environmental friendly. Moreover, they must have a very low ecotoxicity and human toxicity. They have to be easy degradable with no chemical residues. Glyceridic plant oils would fulfill all these prerequisites. They are considered as low risk chemicals and are already authorized for use in organic production. Linseed oil (from *Linum usitatissimum*) and tung oil (from tung tree, *Vernicia fordii*) have fungicidal and insecticidal effects. Despite their advantages they are not used in plant protection to a bigger extend.

The drying plant oils in this study were made according to a new processing. It could be shown that they have a good and reliable protective efficacy against bean rust (*Uromyces appendiculatus*), apple scab (*Venturia inaequalis*) und late blight (*Phytophthora infestans*) up to six days before inoculation with the pathogens. The curative efficacy was less pronounced and only effective up to 4 days after infection. There was no or only a reduced dose response to be observed. A 1% concentration was in most cases sufficient to reach a good control of pathogens. In tomatoes against *P. infestans* a systemic effect could be observed, but in beans against *U. appendiculatus* no such systemic effect could be observed. Differences between linseed oil and tung oil seem to depend on the different film forming capacity.

In contrast to fungicidal efficacy the drying oils showed a curative control against aphids (*Aphis fabae*) or potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). A protective control was less pronounced if observable at all. Adding linoleic or linolenic acid could increase the efficacy and control of the pests.

Drying plant oils were modulating the response of plants against abiotic stress like UV-light or drought. A direct effect of linseed oil and tung oil could be shown. Depending on plant species and plant developmental stage phytotoxic side effects could be observed at higher oil concentrations. Lower oil concentrations had physiological effects as measured by vegetation indices (PSR, NDVI). These effects seem to be determined by the fatty acids in the respective oil.