

**Anwendungsmöglichkeiten von trocknenden Pflanzenölen
zum Schutz von Pflanzen gegenüber
biotischen und abiotischen Stressfaktoren**

Dissertation

zur Erlangung des Grades
Doktorin der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)

der Agrar-, Ernährungs- und Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von
Vera Breiing
aus
Dinslaken

Bonn, 2025

Referent: Prof. Dr. Ralf Pude
Korreferentin: PD Dr. Ulrike Steiner

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2025

Angefertigt mit Genehmigung der Agrar-, Ernährungs- und Ingenieurwissenschaftlichen
Fakultät der Universität Bonn

Zusammenfassung

Pflanzenöle bieten als „Biorationals“ für den Pflanzenschutz zahlreiche Vorteile. Vor allem die Tatsache, dass es sich dabei um natürliche Produkte mit einer geringen ökotoxikologischen Wirkung und einer hohen biologischen Abbaubarkeit handelt, bietet viele Vorteile. Infolgedessen beschäftigt sich diese Arbeit insbesondere mit dem Potenzial von trocknenden glyceridischen Pflanzenölen, die reich an ungesättigten Fettsäuren sind, als natürliche Alternativen für den Pflanzenschutz. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit die Wirkung von unterschiedlichen trocknenden Pflanzenölen (Leinöl & Tungöl) und einem halbtrocknenden Pflanzenöl (Rapsöl) jeweils einzeln und in verschiedenen Mischungen getestet.

Im Rahmen erster Versuchsreihen wurden dabei die Pflanzenöle hinsichtlich ihrer Wirkung auf den physiologischen Zustand von Pflanzen nach Einfach- und Mehrfachbehandlung sowie unter zusätzlichen biotischen und abiotischen Stressfaktoren näher untersucht. Eine Applikation mit einer zweiprozentigen Ölkonzentration zeigte für alle Pflanzenöle eine hohe Pflanzenverträglichkeit. Zur Beurteilung des physiologischen Zustandes wurden zudem unterschiedliche Vegetationsindices herangezogen. Teilweise wurde dabei festgestellt, dass die Pflanzenöle leichte Stressreaktionen in den Pflanzen auslösten und, dass die Öle einen möglichen Einfluss auf die Stomata bzw. auf die Transpiration der Blätter hatten.

Im Rahmen weiterer Gewächshausversuche wurde die protektive und kurative fungizide Wirkung der Pflanzenöle gegenüber Bohnenrost (*Uromyces appendiculatus*) untersucht. Beide getesteten trocknenden Pflanzenöle erzielten eine protektive Wirkung, die beim Leinöl zwischen 53% und 100% und beim Tungöl zwischen 32% und 100% lag, wenn die Applikation zwei oder vier Tage vor der Inokulation durchgeführt wurde. Die Wirksamkeit nahm bei einem längeren Zeitintervall ab. Die kurative Wirkung war hingegen geringer und lag für beide Öle bei maximal 51%, wenn die Applikation bis zu vier Tage nach der Inokulation stattgefunden hatte. Außerdem zeigten die Ergebnisse keine systemische Wirkung der Öle.

Des Weiteren wurde die insektizide Wirkung der Pflanzenöle gegenüber der Schwarzen Bohnenblattlaus (*Aphis fabae*) und dem Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*) getestet. Dabei führte eine zweiprozentige Ölkonzentration zu einer geringeren Fekundität adulter Blattläuse. In den Versuchen zur Mortalität wies vor allem das kurativ applizierte Rapsöl signifikant mehr tote adulte Blattläuse auf. Zudem kam es bei Behandlungen mit Rapsöl zu erhöhten Mortalitäten bei Larven und adulten Kartoffelkäfern, vor allem bei einer kurativen Behandlung mit einer Konzentration von 5%. Außerdem zeigte sowohl eine protektive als auch eine kurative Behandlung mit Tungöl bei adulten Kartoffelkäfern eine hohe Mortalität.

Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial von trocknenden glyceridischen Pflanzenölen als „Biorationals“ im Rahmen nachhaltiger Pflanzenschutzstrategien.

Abstract

Plant oils offer numerous advantages as 'biorationals' for plant protection. Especially the fact that they are natural products with low ecotoxicological side effects, and high biodegradability offers many advantages. Therefore, this thesis deals in particular with the potential of drying glyceridic plant oils, which are rich in unsaturated fatty acids, as natural alternatives for plant protection. In this context, the efficacy of different drying plant oils (linseed oil & tung oil) and a semi-drying plant oil (rapeseed oil) were tested separately and in different mixtures.

As part of the first trials, the plant oils were analysed in more detail with regard to their effect on the physiological condition of plants after single and multiple treatments and under additional biotic and abiotic stress factors. An application with an oil concentration of 2% showed high plant compatibility for all used plant oils. Various vegetation indices were also used to evaluate the physiological condition of the treated plants. It was found that in some cases the plant oils induced a moderate stress reaction in the plants and that the oils had a probable influence on the stomata and transpiration of the leaves.

The protective and curative fungicidal effect of the plant oils against bean rust (*Uromyces appendiculatus*) was analysed in further greenhouse trials. Both tested drying plant oils achieved a protective control ranging from 53%-100% for linseed oil and 32%-100% for tung oil when applied two or four days before inoculation. The efficacy decreased with longer time intervals. However, the curative efficacy was lower with a maximum of 51% for both oils when applied up to four days past inoculation. Furthermore, the results showed no systemic effect of the oils.

In further trials, the insecticidal effect of the plant oils was tested against black bean aphids (*Aphis fabae*) and the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). An oil concentration of 2% caused a lower fecundity of adult aphids. In the trials of mortality, the curative application of rapeseed oil in particular led to significantly higher numbers of dead adult aphids. In addition, treatments of rapeseed oil resulted in increased mortalities of larvae and adult Colorado potato beetles, especially when a curative treatment with a concentration of 5% was applied. Moreover, a protective as well as a curative treatment with tung oil showed a high mortality rate in adult Colorado potato beetles.

These results underline the potential of drying plant oils as 'biorationals' in sustainable plant protection strategies.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XVIII
Allgemeine Einleitung	1
A Wirkung und Eigenschaften trocknender Pflanzenöle	4
1 Einleitung	4
1.1 Öle für den Pflanzenschutz	5
1.2 Verwendete glyceridische Pflanzenöle.....	9
1.3 Phytotoxizität von Pflanzenölen	12
1.4 Spektroskopie	13
1.4.1 Vegetationsindices.....	14
1.5 Hypothesen	17
2 Material und Methoden.....	17
2.1 Versuche zur phytotoxischen Wirkung der Pflanzenöle an Buschbohnen	18
2.1.1 Pflanzenmaterial.....	18
2.1.2 Herstellung der trocknenden Pflanzenöle	18
2.1.3 Versuchsdurchführung und Bewertung zur phytotoxischen Wirkung der Pflanzenöle an Buschbohnen.....	19
2.2 Versuche zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Ölbehandlungen von Apfelsämlingen	19
2.2.1 Pflanzenanzucht.....	19
2.2.2 Versuchsdurchführung zur Mehrfachbehandlung an Apfelsämlingen	20
2.2.3 Versuchsdurchführung zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress an Apfelsämlingen	22
2.3 Versuche zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Ölbehandlungen von Buschbohnen.....	26
2.3.1 Pflanzenanzucht.....	26
2.3.2 Versuchsdurchführung zur Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress an Buschbohnen.....	26

2.4	Statistische Auswertung	28
3	Ergebnisse	29
3.1	Phytotoxische Wirkung der Öle an Buschbohnen.....	29
3.2	Physiologische Pflanzenreaktionen nach Ölbehandlungen	31
3.2.1	Spritzbelag der Öle auf Apfelsämlingen	31
3.2.2	Vegetationsindices nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen	32
3.2.3	Vegetationsindices nach Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress von Apfelsämlingen	40
3.2.4	Reflexion nach Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress von Buschbohnen	48
4	Diskussion	50
5	Fazit	61
B	Fungizide Wirkung trocknender Pflanzenöle.....	63
1	Einleitung	63
1.1	Vorkommen und Biologie von <i>Uromyces appendiculatus</i>	64
1.1.1	Bekämpfungsmaßnahmen gegen Bohnenrost.....	65
1.2	Pflanzenöle als Fungizide.....	68
1.3	Hypothesen	69
2	Material und Methoden.....	69
2.1	Versuche zur fungiziden Wirkung der Öle gegenüber <i>Uromyces appendiculatus</i>	69
2.1.1	Pflanzenanzucht	69
2.1.2	Testpathogen, Inokulation und Bewertung	70
2.1.3	Versuchsdurchführung	70
2.1.4	Versuche zur Dosis-Wirkungs-Beziehung	71
2.1.5	Versuche zur Translokation.....	72
2.1.6	Versuche zum Applikationszeitpunkt	72
2.1.7	Versuche zur kombinatorischen Wirkung von Ölmischungen.....	72
2.2	Statistische Auswertung	73
3	Ergebnisse	74
3.1	Fungizide Wirkung der Öle auf die Entwicklung von <i>Uromyces appendiculatus</i>	74
3.1.1	Dosis-Wirkungs-Beziehung	74
3.1.2	Translokation.....	75
3.1.3	Applikationszeitpunkt	75
3.1.4	Kombinatorische Wirkung von Ölmischungen	78

4	Diskussion	80
5	Fazit	83
C	Insektizide Wirkung trocknender Pflanzenöle	84
1	Einleitung	84
1.1	Vorkommen und Biologie von <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	85
1.1.1	Bekämpfungsmaßnahmen gegen Kartoffelkäfer	86
1.2	Vorkommen und Biologie von <i>Aphis fabae</i>	92
1.2.1	Bekämpfungsmaßnahmen gegen Blattläuse	93
1.3	Pflanzenöle als Insektizide	98
1.4	Hypothesen	100
2	Material und Methoden	100
2.1	Versuche zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	100
2.1.1	Pflanzenmaterial und Schädlinge	100
2.1.2	Versuchsdurchführung und Bewertung	100
2.2	Versuche zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber <i>Aphis fabae</i>	101
2.2.1	Pflanzenanzucht	101
2.2.2	Blattlausstammzucht	102
2.2.3	In vitro Versuchsdurchführung	102
2.2.4	In vivo Versuchsdurchführung	103
2.2.5	Bewertung der Fekundität und Mortalität von <i>Aphis fabae</i>	104
2.3	Statistische Auswertung	105
3	Ergebnisse	106
3.1	Insektizide Wirkung der Öle auf die Mortalität von <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	106
3.2	Insektizide Wirkung der Öle gegenüber <i>Aphis fabae</i>	108
3.2.1	Insektizide Wirkung der Öle auf die Fekundität von <i>Aphis fabae</i>	108
3.2.2	Insektizide Wirkung der Öle auf die Mortalität von <i>Aphis fabae</i>	109
4	Diskussion	113
5	Fazit	117
	Gesamtfazit und Ausblick	118
	Finanzierung	120
	Literaturverzeichnis	121
	Anhang	138
	Danksagung	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fettsäurezusammensetzung (%), Jodzahl und Trocknungslevel von Leinöl, Tungöl und Rapsöl; (Fettsäurezusammensetzung zusammengestellt nach Firestone, 2013 und Suresh et al., 2019). Fettsäuren mit einem besonders hohen Anteil im jeweiligen Öl sind hervorgehoben.	10
Tabelle 2: Informationen über die getesteten Pflanzenöle, verwendeten Abkürzungen aller Behandlungsvarianten und über die getesteten Ölkonzentrationen der Untersuchungen zur phytotoxischen Wirkung der Pflanzenöle an Buschbohnen.....	19
Tabelle 3: Informationen über die getesteten Pflanzenöle, kommerziellen Produkte, Mischungen von Pflanzenölen mit kommerziellen Produkten, verwendeten Abkürzungen aller Behandlungsvarianten sowie über die getesteten Ölkonzentrationen und Wirkstoffe der kommerziellen Produkte der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Mehrfachbehandlung und Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress (<i>Venturia inaequalis</i>) an Apfelsämlingen.	20
Tabelle 4: Verwendete spektrale Vegetationsindices der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen von Apfelsämlingen nach Mehrfachbehandlung mit den Pflanzenölen.	22
Tabelle 5: Boniturschema zur Bewertung des Schadbildes an Blättern der Apfelsämlinge im Rahmen der Untersuchungen zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress (<i>Venturia inaequalis</i>).	24
Tabelle 6: Verwendete spektrale Vegetationsindices der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen von Apfelsämlingen nach Einfachbehandlung mit den Pflanzenölen in Kombination mit biotischem Stress (<i>Venturia inaequalis</i>).	26
Tabelle 7: Informationen über das getestete Pflanzenöl, das verwendete kommerzielle Produkt sowie über die getestete Ölkonzentration und den Wirkstoff des kommerziellen Produktes der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress (UV-Licht) an Buschbohnen.	27
Tabelle 8: Sichtbare Blattschäden an Primärblättern von Buschbohnen, die mit unterschiedlichen Ölkonzentrationen von Leinöl und Rapsöl behandelt wurden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle im Rahmen der Untersuchungen zur phytotoxischen Wirkung der Öle an Buschbohnen.	29
Tabelle 9: Informationen über die getesteten Pflanzenöle und kommerziellen Produkte, verwendeten Abkürzungen aller Behandlungsvarianten, das Verhältnis der eingesetzten Ölmischungen sowie über die getesteten Ölkonzentrationen und Wirkstoffe der	

kommerziellen Produkte der Untersuchungen zur fungiziden Wirkung gegenüber <i>Uromyces appendiculatus</i> an Buschbohnen.....	71
Tabelle 10: Behandlungen und Beschreibung der zeitlichen Abfolge der Öl-Applikation und Platzierung der Kartoffelkäfer (Larven und Adulte) auf Kartoffelblättern für die Untersuchungen zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	101
Tabelle 11: Behandlungen und Beschreibung der zeitlichen Abfolge der Öl-Applikation und Platzierung der Blattläuse auf den Blattscheiben der Ackerbohnen für die Untersuchungen zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber <i>Aphis fabae</i>	103
Tabelle 12: Homogene Untergruppen zugehörig zum Versuch der Mortalität larvaler Kartoffelkäfer (Abbildung 29) (Statistik: ANOVA, $p \leq 0,05$, Tukey-HSD-Test) bezogen auf den jeweiligen Messtermin; statistisch signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten dargestellt durch unterschiedliche Buchstaben; n.s. = nicht signifikant.	107
Tabelle 13: Stichprobenumfang (n) der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Vegetationsindices (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 4, 6, 8, 10, 12).	138
Tabelle 14: Stichprobenumfang (n) der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Vegetationsindices (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 5, 7, 9, 11).	138
Tabelle 15: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der NDVI-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 4). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	138
Tabelle 16: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der NDVI-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 5). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	139
Tabelle 17: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der G-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen	

Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 6). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	139
Tabelle 18: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der G-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 7). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	139
Tabelle 19: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der PRI-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 8). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	140
Tabelle 20: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der PRI-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 9). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	140
Tabelle 21: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der ARI1-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 10). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	140
Tabelle 22: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der ARI1-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 11). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	141
Tabelle 23: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der MSI-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der	

Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 12). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	141
Tabelle 24: Stichprobenumfang (n) der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Vegetationsindices (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 13 bis Abbildung 22).....	141
Tabelle 25: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der NDVI-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 14). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	142
Tabelle 26: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der G-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 15). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	142
Tabelle 27: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der PRI-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 16). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	142
Tabelle 28: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der ARI1-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 17). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	143
Tabelle 29: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Lic2-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung	

18). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	143
Tabelle 30: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Ctr2-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 19). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	143
Tabelle 31: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der R1480/R2135-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 20). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	144
Tabelle 32: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der R1500/R2250-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 21). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	144
Tabelle 33: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der MSI-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 22). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.	144
Tabelle 34: Standardabweichung (SD) der Versuche zur Mortalität larvaler Kartoffelkäfer bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Mortalität larvaler Kartoffelkäfer in Kapitel C 3.1 (Abbildung 29).....	145
Tabelle 35: Standardabweichung (SD) der Versuche zur Mortalität adulter Kartoffelkäfer bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Mortalität adulter Kartoffelkäfer in Kapitel C 3.1 (Abbildung 30).....	145

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Phytotoxische Wirkung (Blattschäden in %) in Abhängigkeit von der Ölkonzentration (Leinöl = blau; Rapsöl = gelb) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (weiß), n = 1. Prozentuale Darstellung der sichtbaren Blattschäden der Blätter aus Tabelle 8..... 30
- Abbildung 2:** Tropfengröße und Verteilung der Pflanzenöle im Vergleich zum eingesetzten Fungizid auf der Blattoberfläche von Apfelsämlingen aus der Versuchsreihe zur Mehrfachbehandlung; dokumentiert unmittelbar im Anschluss an die zweite Behandlung (7 TneB); T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentration = 2%), Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer)..... 31
- Abbildung 3:** Abgetrockneter Spritzbelag der Pflanzenöle im Vergleich zum eingesetzten Fungizid und zur unbehandelten Kontrolle auf der Blattoberfläche von Apfelsämlingen aus der Versuchsreihe der Mehrfachbehandlung; dokumentiert im Anschluss an die vierte Behandlung (21 TneB); T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentration = 2%), Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), K = unbehandelte Kontrolle. 32
- Abbildung 4:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex NDVI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 15 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang). 33
- Abbildung 5:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex NDVI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: PolyPen RP 400 (UVIS) (PP), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 16 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang). 34
- Abbildung 6:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex G von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST), dargestellte homogene

- Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 17 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang). 35
- Abbildung 7:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex G von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: PolyPen RP 400 (UVIS) (PP), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 18 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang). 35
- Abbildung 8:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex PRI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 19 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang). 37
- Abbildung 9:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex PRI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: PolyPen RP 400 (UVIS) (PP), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 20 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang). 37
- Abbildung 10:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex ARI1 von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 21 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang). 39
- Abbildung 11:** Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex ARI1 von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder;

T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: PolyPen RP 400 (UVIS) (PP), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 22 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang). 39

Abbildung 12: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindexes MSI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST), dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 23 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang). 40

Abbildung 13: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf den aus den Bonituren des ersichtlichen Schadbildes berechneten SI von den zwei jüngsten Blattetagen von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; (T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); (n in Tabelle 24 im Anhang). hUg aller Messtermine: n.s. = nicht signifikant. 41

Abbildung 14: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes NDVI inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 25 und n in Tabelle 24 im Anhang). 42

Abbildung 15: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes G inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 26 und n in Tabelle 24 im Anhang). 43

Abbildung 16: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes PRI inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer),

- Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 27 und n in Tabelle 24 im Anhang). 43
- Abbildung 17:** Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes ARI1 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 28 und n in Tabelle 24 im Anhang). 44
- Abbildung 18:** Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes Lic2 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 29 und n in Tabelle 24 im Anhang). 45
- Abbildung 19:** Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes Ctr2 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 30 und n in Tabelle 24 im Anhang). 45
- Abbildung 20:** Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes R1480/R2135 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 31 und n in Tabelle 24 im Anhang). 46
- Abbildung 21:** Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes R1500/R2250 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 32 und n in Tabelle 24 im Anhang). 47
- Abbildung 22:** Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindexes MSI inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer),

- Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 33 und n in Tabelle 24 im Anhang). 48
- Abbildung 23:** Vergleich des Reflexionsmusters (500-600 nm) von Buschbohnen nach täglicher UV-Bestrahlung von 6 h (+UV) und ohne UV-Bestrahlung (-UV), dargestellt 13 Tage nach Behandlung mit (A) CutiSan, (B) Tungöl und (C) Tungöl+CutiSan, Öl-Konzentration von 2%, n = 5. 49
- Abbildung 24:** Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf Buschbohnenblättern nach einer protektiven Applikation (2dbi) von vier verschiedenen Ölkonzentrationen des trocknenden Leinöls (blau) und halbtrocknenden Rapsöls (gelb) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (weiß). Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). n = 5, +SD. 74
- Abbildung 25:** Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf (a) der unteren Hälfte der Primärblätter von *Phaseolus vulgaris* nach einer protektiven Behandlung (2dbi) mit dem trocknenden Leinöl (blau) und dem halbtrocknenden Rapsöl (gelb) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (weiß) und (b) auf der oberen unbehandelten Hälfte derselben Blätter. Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, n.s. = nicht signifikant. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). n = 5, +SD. 75
- Abbildung 26:** Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf Buschbohnenblätter nach (a) einer protektiven Applikation 6dbi, (b) 4dbi und (c) 2dbi und nach (d) einer kurativen Applikation 2dpi und (e) 4dpi von drei Pflanzenölen (L,T und R) und drei kommerziellen Produkte (Cu, Mi und Fu) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K). Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). n = 5, +SD. 77
- Abbildung 27:** Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf Buschbohnenblätter nach (a) einer protektiven Applikation 2dbi, (b) 1dbi und nach (c) einer kurativen Applikation 2dpi von drei Pflanzenölen (L = Leinöl (blau), T = Tungöl (rot), R = Rapsöl (gelb)), vier Ölmischungen ((LT(1), LT(2), LT(3) und LTR) (Mischungsverhältnis s. Tabelle 9) und drei kommerziellen Produkte (Cu, Mi und Fu) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K). Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach dem Games-Howell-Test. Prozentwerte oberhalb stellen

- die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). $n = 5$, +SD. 79
- Abbildung 28:** Beispielhafte Darstellung des in vivo Versuchs mit adulten *Aphis fabae*. (a) Ackerbohne unter transparentem Zylinder; (b) Ackerbohne in Schale mit Papierscheibe zur Abdeckung der Erde für die Auszählung. 104
- Abbildung 29:** Mortalität larvaler Kartoffelkäfer. Zählung der toten Kartoffelkäferlarven im zeitlichen Verlauf von 3 Boniturtagen nach (a) protektiver und (b) kurativer Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (schwarz-weiß gestrichelt); hUg bei $p < 0,05$ nach Tukey-HSD-Test in Tabelle 12, $n = 4$; (SD in Tabelle 34 im Anhang). 106
- Abbildung 30:** Mortalität adulter Kartoffelkäfer. Zählung der toten Kartoffelkäfer im zeitlichen Verlauf von 6 Boniturtagen nach (a) protektiver und (b) kurativer Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (schwarz-weiß gestrichelt), hUg bei $p < 0,05$ nach Tukey-HSD-Test: n.s. = nicht signifikant, $n = 4$, (SD in Tabelle 35 im Anhang). 108
- Abbildung 31:** Anzahl neugeborener Nymphen pro behandelte adulte Blattlaus, Zählung der neugeborenen Nymphen nach 24 h (a) und erneute Zählung nach 48 h (b) nach Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), protektiv behandelte Blattscheiben werden durch ausgefüllte Säulen und kurativ behandelte Blattscheiben durch gestrichelte Säulen dargestellt, unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, $n = 8$, +SD. 109
- Abbildung 32:** Mortalität adulter *Aphis fabae*. Zählung der toten adulten Blattläuse nach 24 h (a) und erneute Zählung nach 48 h (b) nach Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), protektiv behandelte Blattscheiben werden durch ausgefüllte Säulen und kurativ behandelte Blattscheiben durch gestrichelte Säulen dargestellt, unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, n.s. = nicht signifikant, $n = 8$, +SD. 110
- Abbildung 33:** Mortalität von Nymphen von *Aphis fabae*. Zählung der toten Nymphen nach 24 h (a) und erneute Zählung nach 48 h (b) nach Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), protektiv behandelte Blattscheiben werden durch ausgefüllte Säulen und kurativ behandelte Blattscheiben durch gestrichelte Säulen dargestellt, unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, n.s. = nicht signifikant, $n = 8$, +SD. 111

Abbildung 34: Mortalität von Nymphen von *Aphis fabae* (a) und adulter *Aphis fabae* (b) jeweils 48 h nach kurativer Behandlung mit Leinöl (blau) und Tungöl (rot) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, n.s. = nicht signifikant, $n = 8$, +SD. 112

Abkürzungsverzeichnis

a.i.	Wirkstoff (engl.: active ingredient)
ARI1	Anthocyanin Reflectance Index 1
ASD	Analytical Spectral Devices
BVL	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
Ctr2	Carter2 Index
Cu	Funguran® progress (Kupferpräparat)
Cuti	CutiSan® (Kaolinpräparat)
dbi	Tage vor Inokulation (engl.: days before inoculation)
dpi	Tage nach Inokulation (engl.: days past inoculation)
EFSA	European Food Safety Authority
Fu	Flint® (a.i.: Trifloxystrobin)
G	Greenness Index
hUg	homogenen Untergruppen
IPS	Integrierter Pflanzenschutz
IZ	Jodzahl
K	Kontrolle
L	Leinöl
L1	Leinöl (1%)
L2	Leinöl (2%)
Lic2	Lichtenthaler Index 2
Mi	Micula® (Rapsölpräparat)
MSI	Moisture Stress Index
n	Stichprobenumfang
NAP	Nationalen Aktionsplan für die nachhaltige Nutzung von Pflanzenschutzmitteln
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahinfrarot (engl.: Near Infrared)
nm	Nanometer
n.s.	nicht signifikant
PP	PolyPen RP 400 UVIS (Spektrometer von Photon Systems Instruments; 380 nm-790 nm)
PRI	Photochemical Reflectance Index

QST	ASD QualitySpec Trek (Spektrometer von Malvern Panalytical; 350 nm-2500 nm)
R	Rapsöl
rF	relative Luftfeuchtigkeit
SD	Standardabweichung
SI	Schadensindex
T	Tungöl
T1	Tungöl (1%)
T2	Tungöl (2%)
TnB	Tag/e nach Behandlung
TneB	Tag/e nach erster Behandlung
UV	Ultraviolett
VI	Vegetationsindex/ Vegetationsindices
VIS	Sichtbares Licht (engl.: Visible)
W	Watt
Ø	Durchmesser

Allgemeine Einleitung

Es entspricht dem gesunden Menschenverstand, dass eine hohe Nahrungsmittelproduktion erforderlich ist, um eine wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Im Rahmen der „Grünen Revolution“ in den 1960er Jahren konnte, durch den Einsatz ertragreicher Nutzpflanzen, die globale Nahrungsmittelproduktion gesteigert werden (Gaud, 1968). Die positiven Aussichten der „Grünen Revolution“ brachten durch die eingesetzten Technologien aber auch gewisse Nachteile mit sich. Denn die technologischen und institutionellen Prioritäten wurden erst später gesetzt (Pingali, 2012). Einen wichtigen Beitrag für diese Entwicklung leisteten aber neben dem Einsatz von neuem Saatgut und Düngemitteln (Gaud, 1968) vor allem chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel, um Nutzpflanzen gegen Krankheitserreger und Schädlinge zu schützen (Tilman et al., 2002). Pflanzenschutzmittel sind dem Artikel 2 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 nach unter anderem Produkte, die versuchen „Pflanzen oder Pflanzenerzeugnisse vor Schadorganismen zu schützen oder deren Einwirkung vorzubeugen“ (EU Verordnung (EG) Nr. 1107/2009).

Durch einen vermehrten Einsatz intensiver Landnutzung und einer verstärkten Nutzung von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln wurden jedoch, hinsichtlich negativer Auswirkungen auf die gesamte Umwelt, immer häufiger Bedenken geäußert. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Landwirtschaft immer deutlicher in die Richtung einer „nachhaltigen Landwirtschaft“ entwickelt, die u.a. eine minimale Bodenbearbeitung, eine diversifizierte Fruchtfolge und ein effizientes Management von Ernterückständen beinhaltet. Aber auch in dieser „nachhaltigen Landwirtschaft“ stellt der Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel weiterhin ein Risiko für die Umwelt dar (Sanaullah et al., 2020). 2021 lag der durchschnittlich jährliche Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bei 7,3 kg bzw. bei 2,4 kg Wirkstoff je ha Anbaufläche in Ackerland und Dauerkulturen (UBA, 2023). Diese Mengen haben nachweislich einen Einfluss auf die Umwelt, beispielsweise auf das Grundwasser oder oberirdische Gewässer (UBA, 2023), und demzufolge auch auf Menschen und Tiere. Die Herausforderung, die heutige und zukünftige Weltbevölkerung zu ernähren, ist weiterhin ein wichtiges Thema, und der Umgang mit Pflanzenkrankheiten und Schädlingen spielt bei der Bewältigung dieser Herausforderung eine wichtige Rolle (Nelson, 2020). Daher wird im Allgemeinen akzeptiert, dass ein effizienter Pflanzenschutz erforderlich ist. Dieser sollte jedoch durch umweltverträgliche Maßnahmen erreicht werden. Diese Maßnahmen sollten sich zudem in die acht Prinzipien des integrierten Pflanzenschutzes (IPS) einfügen (Barzman et al., 2015).

Viele Länder in der Europäischen Union (EU) haben daher nationale Regelungen und Pläne entwickelt, um diese Ziele zu erreichen. In diesem Zusammenhang verlangt auch die Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates die nachhaltige Verwendung von

Pestiziden und regelt die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (EU Richtlinie 2009/128/EG). Darüber hinaus verpflichten sich die jeweiligen Mitgliedstaaten auch nationale Aktionspläne zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu verabschieden (BMEL, 2023). Deutschland hat in diesem Zuge beispielsweise den „Nationalen Aktionsplan für die nachhaltige Nutzung von Pflanzenschutzmitteln“ (NAP) entwickelt, um den Einsatz chemischer Pestizide zu reduzieren und, um das Portfolio nicht-chemischer Pflanzenschutzmethoden zu erweitern. Ziel des NAP ist es, umweltfreundliche, natürliche und biologische Lösungen für den Pflanzenschutz zu entwickeln und diesen auszuweiten (BMEL, 2017). Zudem stellt das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) regelmäßig eine Übersicht an Pflanzenschutzmitteln zusammen, die nach der Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 auch im ökologischen Landbau eingesetzt werden können. Bei dieser Übersicht handelt es sich jedoch lediglich um ein Serviceangebot des BVL und ist keine amtliche Einstufung der aufgeführten Mittel und Wirkstoffe (BVL, 2023a).

Neben den beschriebenen Strategien sollen Pflanzenschutzmittel vor allem ein geringes Risiko für Mensch und Umwelt aufweisen (EU Verordnung (EG) Nr. 1107/2009). Als eine passende Alternative werden in diesem Zusammenhang seit ein paar Jahren „Biorationals“ diskutiert (Feldmann & Carstensen, 2018) und, wie sie sich in die Strategien des integrierten Pflanzenschutzes einbinden lassen (Matyjaszczyk, 2018). Eine genaue Definition von „Biorationals“ ist schwierig, doch der Begriff wird für Pflanzenschutzstrategien verwendet, von denen angenommen wird, dass sie ein geringes Risiko für die gesamte Umwelt darstellen und ein akzeptables Niveau erreichen, um ein Maß an Kontrolle bestimmter Schädlinge oder Krankheitserreger zu gewährleisten. Im Allgemeinen schließt das biologisch abgeleitete Materialien ein, aber auch synthetische Materialien, wenn diese von der Struktur her ähnlich und funktionell identisch zu den biologisch gewonnenen Materialien sind. Demnach zählen zu den „Biorationals“ u.a. Mikroorganismen, Pflanzenextrakte, Grundstoffe („basic substances“), aber auch nicht-pestizide Produkte, wie Biostimulantien, biologische Ertragssteigerer („biological yield enhancers“), Pflanzengesundheitsförderer („plant health promoters“) oder Bodenverbesserer („soil conditioners“) (Feldmann & Carstensen, 2018). Galli et al. (2024) betonen zudem, dass biologische Pflanzenschutzmaßnahmen einen umfangreicheren Einzug in den integrierten Pflanzenschutz halten sollten und schreiben diesen Maßnahmen das Potenzial zu, den IPS grundlegend zu verändern. Auch wenn die anfänglichen Kosten für die Einführung höher sein mögen, werden die langfristigen Vorteile der biologischen Pflanzenschutzmaßnahmen, wie beispielsweise die Verringerung des Kaufs chemischer Mittel oder die Erhaltung der Bodengesundheit und der Ökosystemleistungen, die wirtschaftliche Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe in der Zukunft verbessern (Galli et al., 2024). Natürliche Produkte wie glyceridische Pflanzenöle (Ah Chee et al., 2018) stellen vielversprechende Kandidaten für einen solchen nachhaltigen Ansatz dar. Auf der einen Seite

weisen sie nur eine geringe Humantoxizität auf, sind biologisch gut abbaubar (Lligadas et al., 2013) und können in ihrer Zusammensetzung verändert werden. Auf der anderen Seite sind sie zudem mit anderen Stoffen oder Flüssigkeiten mischbar (Alam et al., 2014) und in der Umwelt nicht persistent (Horowitz et al., 2009). Darüber hinaus sind einige Pflanzenöle in der Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 der Kommission in Anhang I als Wirkstoffe aufgelistet, die in Pflanzenschutzmitteln zur Verwendung in der ökologischen bzw. biologischen Produktion enthalten sein dürfen. Neben beispielsweise Rapsöl sind auch Fettsäuren für die ökologische bzw. biologische Produktion zugelassen, solange ihre Anwendung im Einklang mit der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 steht und sie nicht als Herbizide eingesetzt werden (Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165; BVL, 2023b). Somit stellen auch weitere glyceridische Pflanzenöle vor allem im Hinblick auf das Pflanzenschutzgesetz und eine mögliche Zulassung als Insektizide bzw. Fungizide potenzielle Kandidaten dar.

Folglich haben im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Versuche stattgefunden, um das Potenzial von verschiedenen glyceridischen Pflanzenölen, als mögliche natürliche Alternativen für den Pflanzenschutz, zu untersuchen und, um die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse in diesem Bereich zu erweitern. In dieser Arbeit wurde daher die Wirksamkeit von ausgewählten glyceridischen Pflanzenölen anhand von drei inhaltlichen Schwerpunkten näher betrachtet. Demzufolge werden die allgemeine Wirkung und die Eigenschaften von ausgewählten glyceridischen Pflanzenölen (Kapitel A), ihre potenzielle fungizide (Kapitel B) sowie insektizide Wirkung (Kapitel C) dargestellt.

A Wirkung und Eigenschaften trocknender Pflanzenöle

1 Einleitung

In einer zunehmend ökologisch denkenden Gesellschaft steht die heutige Landwirtschaft aufgrund der hohen Pflanzenschutzmittelanwendungen immer mehr in der Kritik. Viele derzeitige Pflanzenschutzmittel haben einen negativen Einfluss auf die Umwelt und den Menschen. Um diesen negativen Einflüssen entgegenzuwirken, müssen alternative Lösungswege untersucht werden. Auf der Suche nach Alternativen im Pflanzenschutz rücken somit „Biorationals“ und natürliche Produkte immer weiter in den Vordergrund (Feldmann & Carstensen, 2018). Natürliche Produkte wie glyceridische Pflanzenöle (Ah Chee et al., 2018) stellen, wie bereits beschrieben, in diesem Zusammenhang mögliche vielversprechende Kandidaten dar.

Pflanzenöle bestehen hauptsächlich aus Triglyceriden, einem Glycerinmolekül, das mit drei langkettigen Fettsäuren verestert ist (Thomas et al., 2015). Die Eigenschaften von Pflanzenölen hängen von der Kettenlänge der Fettsäuren, dem Anteil der ungesättigten Fettsäuren sowie der Anzahl und Position der Doppelbindungen ab. Pflanzenöle mit einem hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren zeichnen sich durch eine geringe Oxidationsstabilität und schnelle Trocknung aus (Derksen et al., 1995; Oyman et al., 2005). Außerdem ist die Jodzahl dabei ein Maß für die Charakterisierung von Fetten anhand des Gehalts an ungesättigten Fettsäuren. So können basierend auf der Jodzahl (IZ) und dem Gehalt an bestimmten Fettsäuren Pflanzenöle in nicht-trocknende (IZ: 75-100), halbtrocknende (IZ: 100-150) und trocknende Öle (IZ: 150-190) unterteilt werden (Tabelle 1, Kapitel A 1.2). Die mehrfach ungesättigten Fettsäuren α -Elaeostearinsäure (z.B. im Tungöl) und Linolensäure (z.B. im Leinöl) haben aufgrund ihrer Eigenschaften die Fähigkeit, zu einer ausgehärteten wasserdichten Schicht zu trocknen (Roth & Kormann, 2000; Roth & Kormann, 2005). Die schnelle Trocknung des Tungöls wird durch drei konjugierte Doppelbindungen in der Fettsäurezusammensetzung des Öls verursacht (Oyman et al., 2005). Nach der Anwendung trocknen diese Öle durch Oxidation in Kontakt mit Luft und nicht primär durch Verdunstung und bilden eine Beschichtung auf der Oberfläche (Roth & Kormann, 2000; Roth & Kormann, 2005; Soucek et al., 2012). Rapsöl gehört aufgrund eines geringeren Anteils an mehrfach ungesättigten Fettsäuren und eines niedrigeren IZ von 94-126 zu den halbtrockenen Ölen (Firestone, 2013; Roth & Kormann, 2005).

Dieses Prinzip der Filmbildung wird seit langem in der Farben- und Kosmetikindustrie sowie in der Medizin angewendet (Hefter, 1921). Pflanzenölfilme werden in der Medizin zunehmend zur Wundabdeckung, als Träger in Medikamenten und zur Geweberegeneration eingesetzt. Die Hauptvorteile sind die sehr geringe Humantoxizität und die gute biologische Abbaubarkeit (Lligadas et al., 2013). Ein weiterer Vorteil dieser trocknenden Pflanzenöle ist die große Bandbreite an möglichen Modifikationen und Kombinationen mit anderen Stoffen. Dazu

gehören die verschiedenen Film- und Trägermaterialien, die Entwicklung von Mikro- oder Hydrogelen (Miao et al., 2013) und die Mischbarkeit mit Wasser als Lösungsmittel (Alam et al., 2014). Trotz der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten werden trocknende Pflanzenöle bisher nicht in der Landwirtschaft und im Gartenbau eingesetzt. Pflanzenöle könnten jedoch aufgrund ihrer geringen ökotoxikologischen Nebenwirkungen, ihrer hohen biologischen Abbaubarkeit und geringen warmblütigen Toxizität bei der Entwicklung umweltfreundlicher Pflanzenschutzmittel von Vorteil sein (Lligadas et al., 2013).

Auf der Suche nach Alternativen werden im folgenden Kapitel A die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten glyceridischen Pflanzenöle Leinöl, Tungöl und Rapsöl vorgestellt und ihre physiologische Wirkung auf Pflanzen dargestellt.

1.1 Öle für den Pflanzenschutz

Mineralöle

Aus Erdöl gewonnene Öle sind in der Gesellschaft seit langer Zeit ein fester Bestandteil, beispielsweise in Körperpflegeprodukten, Reifen, elektrischen Transformatoren oder Schmierstoffen für Motoren und Maschinen. Nicht alle aus Erdöl gewonnenen Öle eigneten sich jedoch als Ausgangsstoffe für Produkte, die für den Pflanzenbau oder für die generelle Ausbringung in die Umwelt in Betracht gezogen werden konnten (Kuhlmann & Jacques, 2002). Lediglich hochraffinierte Produkte auf Erdölbasis mit einer hohen Sicherheit, sogenannte „Mineral Oils“, fanden folglich Eingang im Bereich Pflanzenschutz (Agnello, 2002; Kuhlmann & Jacques, 2002). Mineralöle wurden dementsprechend bereits seit über einem Jahrhundert zur Schädlingsbekämpfung eingesetzt. Kontinuierlich durchgeführte Studien über die Wirksamkeit und die Chemie von Ölen auf Erdölbasis führten zur Identifizierung der wichtigsten Faktoren, die mit der insektiziden Wirkung und der Phytotoxizität zusammenhingen. Dadurch wurde die Entwicklung von raffinierteren und wirksameren Pflanzenschutzmitteln ermöglicht. Während die Öle früher auf beispielsweise frühe Spritzungen beschränkt waren, um eine Schädigung des grünen Pflanzengewebes durch das Öl zu vermeiden, wurden neuere, sogenannte „highly refined horticultural mineral oils“ sowie „agricultural mineral oils“, zunehmend für ihren Einsatz und ihre Kompatibilität mit modernen Schädlingsbekämpfungsmethoden akzeptiert (Agnello, 2002). Demzufolge wurden auch Produkte mit geringer Wirkung in Betracht gezogen und hinsichtlich ihrer Eignung für einen Einsatz im Rahmen von integrierten Schädlingsbekämpfungsprogrammen untersucht (Buteler & Stadler, 2011).

Baliota und Athanassiou (2023) erläuterten, dass die Wirkungsweise von Ölen auf Basis von Erdöl sehr komplex ist. Sie fassten umfangreich zusammen, dass überraschenderweise die bekanntesten Theorien des Erstickens, wie die Beeinträchtigung des normalen

Gasaustauschs bei der Atmung des Schädling durch das Öl, nur unter bestimmten Bedingungen in Bezug auf die Öle und die Zielschädlingsarten den entscheidenden Faktor darstellen. Zudem resümierten Baliota und Athanassiou (2023) die Erkenntnisse aus unterschiedlichen Veröffentlichungen. Sie fassten dementsprechend zusammen, dass verschiedene Beobachtungen der Symptome, die durch die Toxizität der Öle verursacht werden, darauf hindeuten, dass im Körper der Insekten nach der Ölbehandlung eine Reihe von Reaktionen auftreten. Beispielsweise können Behandlungen mit Ölen auf Erdölbasis zum Ersticken führen, die Farbe, Durchlässigkeit und die Dehydration der Kutikula verändern, die Nahrungsaufnahme sowie die Eiablage bei Insekten verhindern, das Nervensystem stören oder die Kontraktion des Abdomens der Insekten beeinflussen. Nach Baliota und Athanassiou (2023) hängt folglich die Toxizität der Öle von bestimmten Eigenschaften der Oberfläche, der Biochemie oder des Stoffwechsels sowie von den Taxa und dem Stadium der Zielarten ab. Aber auch die Herstellung, chemische Raffination und Aufbereitung sowie die Applikationsmengen und -methoden der Öle haben einen Einfluss auf die insektizide Wirkung. In der Vergangenheit wurden Mineralöle wegen ihrer hohen Wirksamkeit bei der Bekämpfung von Schadinsekten in Gartenbaukulturen gegenüber Pflanzenölen bevorzugt (Nicetic et al., 2010). Allerdings wurde aufgrund ihrer potenziell phytotoxischen Wirkungen zunächst relativ wenig Forschung zu ihrer Einführung in die landwirtschaftliche Praxis betrieben. In den letzten Jahren hat jedoch das Interesse an erdölbasierten Pflanzenschutzmitteln aufgrund ihrer Kompatibilität mit Programmen der integrierten Schädlingsbekämpfung zugenommen (Baliota & Athanassiou, 2023). Verbesserungen bei den Raffinationsmethoden haben die Herstellung kommerzieller Produkte mit vielen vorteilhaften Eigenschaften gegenüber den ursprünglichen Ölformeln ermöglicht (Agnello, 2002; Baliota & Athanassiou, 2023).

Nichtsdestotrotz hat in den letzten Jahren ein zunehmender Druck in Richtung ökologisch nachhaltiger Schädlingsbekämpfungsstrategien das Interesse an der Verwendung von Pflanzenölen und an den Gründen für die Unterschiede in der Wirksamkeit von Pflanzenölen und Mineralölen erneut geweckt (Nicetic et al., 2010). Nicetic et al. (2010) verglichen beispielsweise die Wirksamkeit von Raps- und Mineralölen im Hinblick auf die unterschiedlichen Wirkungsweisen. Sie beschäftigten sich zum einen mit der Wirkung der Öle hinsichtlich einer möglichen erstickenden Wirkung bei der Bekämpfung von *Saissetia oleae* an Oliven und zum anderen mit einer hemmenden Wirkung auf die Eiablage von *Phyllocnistis citrella* an Zitronen. Im Rahmen der Untersuchungen an Oliven konnten sowohl Raps- als auch Mineralölbehandlungen die Anzahl der schwarzen Schildläuse im Vergleich zur Kontrolle signifikant reduzieren, wobei das Mineralöl die Anzahl der schwarzen Schildläuse signifikant stärker reduzierte als das Rapsöl.

Themenbereiche wie Chemie, Raffination und Formulierung von Mineralölen, die Wirkungsweise gegen Arthropoden oder deren Mortalität, Phytotoxizität und physiologische

Auswirkungen auf Pflanzen, Umwelt- und Gesundheit sowie der Einsatz in der Schädlings- und Krankheitsbekämpfung deuten auf eine Zukunft der Mineralöle in der Landwirtschaft hin. Die aktuellen Anforderungen an Herstellung, chemische Raffination und Reinigung spiegeln Einsatzmöglichkeiten wider, bei denen hochwertige Ölprodukte für bestimmte Behandlungsverfahren hergestellt werden, die umweltverträglich und toxikologisch unbedenklich sind und sich in das Konzept des integrierten Pflanzenschutzes einfügen lassen (Baliota & Athanassiou, 2023).

Ätherische Öle

Ätherische Öle sind aromatische, flüchtige Substanzen, die u.a. durch Wasserdampfdestillation (Ríos, 2016) oder durch Extraktion (Aziz et al., 2018) aus unterschiedlichen Pflanzenmaterialien gewonnen werden können. Ätherische Öle bestehen hauptsächlich aus lipophilen und leicht flüchtigen sekundären Pflanzenstoffen, vor allem bestehen sie aus Terpenen. Aber auch andere Arten von Verbindungen, wie Phenole, können enthalten sein (Ríos, 2016). Insbesondere die Terpene und Terpenoide besitzen nach Masyita et al. (2022) ein breites Wirkungsspektrum. Zu diesem Wirkungsspektrum zählen beispielsweise antimikrobielle, entzündungshemmende, antioxidative oder antiallergische Eigenschaften (Masyita et al., 2022). Die Anwendungsmöglichkeiten ätherischer Öle können somit sehr vielfältig sein. Folglich werden sie auf der einen Seite häufig in Kosmetika und Parfüms verarbeitet, auf der anderen Seite werden sie hinsichtlich ihrer therapeutischen Eigenschaften auch in der Medizin eingesetzt (Ríos, 2016). Angesichts antimikrobieller und konservierender Eigenschaften wird zudem ein Potenzial von ätherischen Ölen für die Lebensmittelindustrie gesehen (Masyita et al., 2022). Darüber hinaus finden sie aufgrund ihrer antimikrobiellen und antioxidativen Wirkung auch in der Landwirtschaft Verwendung (Ríos, 2016). Allerdings kann die Zusammensetzung von ätherischen Ölen sehr unterschiedlich sein. Diese Variation kann nach Ríos (2016) zum einen genetische Ursachen haben, zum anderen auch durch das Klima, durch unterschiedliche Niederschlagsmengen oder die geografische Herkunft der Pflanzen beeinflusst werden.

Nichtsdestotrotz ist das Interesse an ätherischen Pflanzenölen als biologische Alternative im Bereich Pflanzenschutz in den letzten Jahren gestiegen (Kesraoui et al., 2022), denn das Verständnis hinsichtlich des Einsatzes von synthetischen Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft hat sich verändert. Infolgedessen hat sich auch die Wissenschaft auf die Erforschung von Naturprodukten verlagert, die eine gute Wirksamkeit im Bereich Pflanzenschutz aufweisen und zudem umweltfreundlich sind (Basaid et al., 2021). Aus diesem Grund hat sich die Wissenschaft bereits mit unterschiedlichen ätherischen Ölen im Bereich Pflanzenschutz beschäftigt. Folglich gibt es verschiedene Untersuchungen zu ätherischen Pflanzenölen zur Bekämpfung von Insekten (Rafiee-Dastjerdi et al., 2014) oder Pathogenen

(Tomazoni et al., 2017). Viele ätherische Pflanzenöle weisen dabei ein breites Wirkungsspektrum gegenüber Schadinsekten (Pavela, 2016) und Pathogenen (Koul et al., 2008) auf. Dieses Wirkungsspektrum reicht u.a. von einer abschreckenden (Khan, 2021) sowie wachstumsregulierenden Wirkung (Koul et al., 2008), bis hin zur Verhinderung der Eiablage bei Schadinsekten (Kesraoui et al., 2022; Khan, 2021). Elshafie et al. (2015) konnten beispielsweise im Rahmen von in vivo Versuchen eine potenzielle fungizide Wirkung von zwei ätherischen Ölen, gewonnen aus dem Echten Thymian (*Thymus vulgaris*) und dem Echten Eisenkraut (*Verbena officinalis*), gegenüber *Monilinia laxa*, *Monilinia fructigena* und *Monilinia fruticola* an Pfirsichfrüchten zeigen. Im Rahmen ihrer Versuche verringerten die höheren Konzentrationen der beiden untersuchten ätherischen Öle von Eisenkraut und Thymian den Durchmesser der Braunfäule signifikant. Elshafie et al. (2015) führten die Wirkung der ätherischen Öle auf die hohen prozentualen Anteile an Monoterpenen und phenolischen Verbindungen der Öle zurück. Ergänzend fassten sie zusammen, dass eine Anwendung von ätherischen Ölen mit weiteren Nacherntebehandlungen kombiniert werden sollte. Ebadollahi et al. (2021) stellten zudem eine Übersicht zur akariziden, insektiziden und nematiziden Wirksamkeit von ätherischen Ölen aus der Gattung *Satureja* (Bohnenkräuter) zusammen. Die aus unterschiedlichen *Satureja*-Arten isolierten ätherischen Öle werden bereits in der Medizin, der Kosmetik- und der Lebensmittelindustrie verwendet. Demzufolge wird auch ein großes Potenzial in der Schädlingsbekämpfung gesehen, was auf die hohen Mengen an Terpenen in den Ölen zurückgeführt wird. Ebadollahi et al. (2021) fassten folglich die Wirkungen von achtzehn *Satureja*-Arten unter Betrachtung von Letalität, ihrer Wirkung bezüglich Abschreckung und Entwicklungshemmung sowie ihren Auswirkungen auf die Nahrungsaufnahme, auf den Lebenszyklus von Schädlingen, auf ihre Eiablage und den Schlupf zusammen.

Im Jahr 2012 erstellte Zimmermann darüber hinaus eine Übersicht zur Wirkung und zu den Anwendungsmöglichkeiten ätherischer Öle im Pflanzenschutz. Im Rahmen dieser Arbeit fasste Zimmermann (2012) bereits zusammen, dass bei Pflanzen, die ätherische Öle enthalten, vor allem den jeweiligen Öl-Zusammensetzungen eine besondere Bedeutung zugeschrieben wird. Zu diesen Inhaltsstoffen zählen beispielsweise Alkohole, Ester, Ketone, Terpene, Phenole und anderen aromatische Verbindungen. Außerdem erwähnte Zimmermann (2012), dass die Inhaltsstoffe der ätherischen Öle als Signal- oder Botenstoffe agieren und demzufolge sowohl eine insektizide als auch fungizide Wirkung aufweisen können. Ätherische Pflanzenöle werden dementsprechend beispielsweise als Bestandteile von Insektiziden, Akariziden, Fungiziden und Nematiziden anerkannt (Kesraoui et al., 2022). Allerdings fasste Zimmermann (2012) auch zusammen, dass für eine Kommerzialisierung von ätherischen Ölen als entsprechende Produkte im Bereich Pflanzenschutz noch Hürden bestehen. Unter anderem stellen die begrenzte Verfügbarkeit von entsprechenden

Aromapflanzen, mit ihren sowieso schon sehr geringen Gehalten an ätherischen Ölen, die notwendige chemische Standardisierung und Qualitätskontrolle sowie die Beantwortung bestimmter Zulassungsfragen solche Hürden dar.

Und auch Ríos (2016) wies bereits auf die Problematik von unterschiedlichen Variationen hin, die beispielsweise durch genetische Ursachen, Klimaeinflüsse, unterschiedliche Niederschlagsmengen oder die geografische Herkunft der Pflanzen beeinflusst werden können. All diese Aspekte stellen Hindernisse für einen entsprechenden Einsatz von ätherischen Ölen im Bereich Pflanzenschutz dar. Ätherische Öle können allerdings aufgrund ihrer oben beschriebenen Wirksamkeit eine mögliche Alternative im Rahmen eines IPS darstellen.

1.2 Verwendete glyceridische Pflanzenöle

Leinöl

Der Lein (*Linum usitatissimum* L.), auch bekannt als Flachs, wird als Kulturpflanze weltweit in vielen Regionen angebaut. Sie ist eine der ältesten Kulturpflanzen der Welt und gehört zur Familie der Linaceae. Dabei unterscheidet man hauptsächlich zwischen Öllein (*Linum usitatissimum* convar. *mediterraneum*) und Faserlein (*Linum usitatissimum* convar. *usitatissimum*). Das Öl des Ölleins wird durch Kalt- und Heipressung sowie durch Extraktion der zerkleinerten Samen gewonnen, wobei die Samen 30-40% Öl enthalten. Je nach Reinheitsgrad wird dabei zwischen rohem, gebleichtem und raffiniertem Leinöl unterschieden. Leinöl findet unter anderem Anwendung in der Lebensmittelindustrie, der Medizin und Lackindustrie (Roth & Kormann, 2005). Basierend auf einer Jodzahl (IZ) von 155-205 und seiner Fettsäurezusammensetzung wird das Leinöl den trocknenden Ölen zugeordnet (Firestone, 2013; Roth & Kormann, 2005). Vor allem die mehrfach ungesättigte Fettsäure, die Linolensäure, die einen großen Teil des Leinöls ausmacht, sorgt für eine schnelle Trocknung an der Luft (Roth & Kormann, 2005). Nähere Informationen zur Fettsäurezusammensetzung (%), Jodzahl und zum Trocknungslevel von Leinöl sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Leinöl ist derzeit nicht als Pflanzenschutzmittel zugelassen (BVL, 2023b).

Dennoch gibt es Studien, die sich bereits mit einer möglichen fungiziden und insektiziden Wirkung des Leinöls beschäftigt haben. Beispielsweise führte Brendel (2013) bereits Versuche mit Leinöl in einem Gemisch mit Orangenöl gegenüber der Kleinen Weißen Rosenschildlaus durch. Auch Arslan (2014) erforschte die fungizide Wirkung von Leinöl gegenüber *Uromyces appendiculatus*. Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich ableiten, dass Leinöl vor allem durch seine Eigenschaft als schnell trocknendes glyceridisches Pflanzenöl ein hohes Potenzial als Pflanzenschutzmittel aufweist.

Tabelle 1: Fettsäurezusammensetzung (%), Jodzahl und Trocknungslevel von Leinöl, Tungöl und Rapsöl; (Fettsäurezusammensetzung zusammengestellt nach Firestone, 2013 und Suresh et al., 2019). Fettsäuren mit einem besonders hohen Anteil im jeweiligen Öl sind hervorgehoben.

Fettsäure	Zahl der C-Atome:Doppelbindungen (Stellung, Konfiguration)	Leinöl ¹	Tungöl ¹	Rapsöl ¹
Myristinsäure	14:0	-	-	0-0,2
Palmitinsäure	16:0	4-9,3	3,0-4,1	3,3-6
Palmitoleinsäure	16:1 (9c)	0-0,1	-	0,1-0,6
Margarinsäure	17:0	-	-	0,3
Stearinsäure	18:0	2-16	1,3-2,7	1,1-2,5
Ölsäure	18:1 (9c)	14-39	8-14,9	33-67
Linolsäure	18:2 (9c,12c)	7-25	10,9-11,5	16-25
Linolensäure	18:3 (undefiniert) ²	35-66	-	6-14
α-Elaeostearinsäure	18:3 (9c,11t,13t)	-	63,8-79,7	-
Arachinsäure	20:0	0-0,1	-	0,2-0,8
Gadoleinsäure	20:1 (9c)	-	-	0,1-3,4
Eicosadiensäure	20:2 (11c,14c)	-	-	0-0,1
Behensäure	22:0	-	0-8,3	0-0,5
Undefiniert	22:1	-	-	0-4,7
Docosadiensäure	22:2 (13c,16c)	-	-	0-0,1
Lignocerinsäure	24:0	-	-	0-0,2
Nervonsäure	24:1(15c)	-	-	0-0,4
Jodzahl³				
(nach Firestone, 2013)		155-205	147-175	110-126
(nach Roth & Kormann, 2005)		165-190	147-172	94-120
Trocknungslevel				
(nach Roth & Kormann, 2005)		trocknend	trocknend	nicht-trocknend / halbtrocknend

¹ Die Fettsäurezusammensetzung bezieht sich auf verschiedene Pflanzenarten, insbesondere die Fettsäurezusammensetzung von Tungöl ist eine Zusammenfassung der folgenden Arten: *Aleurites fordii* Hemsl., *Vernicia montana*, *Vernicia fordii*; die Zusammensetzung von Rapsöl (*Brassica napus* L.) (erucasäurearm, Canola) ist artabhängig. ² Zusammenfassend α-Linolensäure (9c, 12c, 15c) und γ-Linolensäure (6c, 9c, 12c). ³ Definition der Jodzahl (nach Roth & Kormann, 2005): Die Jodzahl (JZ) gibt an, wie viel Halogen, ausgedrückt in Prozent Jod, ein Fett/Fettsäure zu addieren vermag. Je nach Anzahl der vorhandenen Doppelbindungen addieren die ungesättigten Fettsäuren 2, 4, 6 oder mehr Atome Halogen (es entsteht dabei das entsprechende Fettsäurehalogenid), während die gesättigten Fettsäuren kein Halogen addieren. Konfiguration: c = cis, t = trans.

Tungöl

Tungöl wird aus den Samen bzw. Kernen des Tungölbaums (*Aleurites fordii* H.) gewonnen. Der Baum, auch Holzölbaum genannt, ist in Zentral- und Westchina beheimatet. (Krist, 2013). Der Hauptverwendungszweck liegt, wie beim Leinöl, in der technischen Industrie (Krist, 2013), vor allem in der Lack- und Farbindustrie (Hefter, 1921). Aus dem Rohstoff werden u.a. Isoliermaterialien, Linoleum, schnell trocknende Holzfirnisse oder wasserdichte Gewebe produziert (Krist, 2013). Die Kerne des Tungölbaums weisen dabei einen Ölgehalt von 53-60% auf. Für die Ölgewinnung werden die Kerne zunächst, nach dem Entfernen der Schale, gemahlen und anschließend gepresst. (Roth & Kormann, 2005). Das gewonnene Tungöl hat

eine Jodzahl von 147 bis 175 und die Fettsäurezusammensetzung des Tungöls zeigt, dass der Anteil der α -Elaeostearinsäure ca. 80% beträgt (Firestone, 2013). Diese mehrfach ungesättigte Fettsäure hat aufgrund ihrer Eigenschaften die Fähigkeit, schnell zu trocknen und eine ausgehärtete wasserdichte Schicht zu bilden (Roth & Kormann, 2000; Roth & Kormann, 2005). Darüber hinaus ist bekannt, dass Tungöl eine gelatineartige Konsistenz haben kann und aufgrund dieser Eigenschaft bei der Herstellung von wasserfestem Gewebe und Papier verwendet wird (Roth & Kormann, 2005). Auch zum Tungöl finden sich in Tabelle 1 weiterführende Informationen hinsichtlich Fettsäurezusammensetzung, Jodzahl und Trocknungslevel. Das Tungöl ist ebenfalls nicht als Pflanzenschutzmittel zugelassen (BVL, 2023b).

Bereits 1943 führten Clayton et al. Versuche mit trocknenden, glyceridischen Pflanzenölen, wie dem Tungöl, durch. Sie stellten fest, dass der durch *Peronospora tabacina* verursachte Blauschimmel an Tabak u.a. durch das eingesetzte Tungöl reduziert werden konnte. Sie dokumentierten, dass die Fettsäurezusammensetzung für die fungizide Wirkung eine bedeutende Rolle spielen könnte. Durch diese ersten Erkenntnisse lässt sich auch für das Tungöl annehmen, dass es durch seine Eigenschaft als schnell trocknendes glyceridisches Pflanzenöl ebenfalls ein hohes Potenzial als Pflanzenschutzmittel aufzeigt.

Rapsöl

Rapsöl wird aus den reifen Samen des Raps (*Brassica napus* L.) gewonnen. Es zählt zu den weltweit meist produzierten Pflanzenölen (Krist, 2013). Die Samen des Rapses weisen einen Ölgehalt von ca. 42% auf. Um das Rapsöl zu gewinnen, werden die gemahlenen Samen zunächst durch Kaltpressung und anschließend durch Heißpressung oder Extraktion gewonnen. Heißgepresstes Öl enthält hingegen oft Schwefelverbindungen, die bei der anschließenden Raffination entfernt werden (Roth & Kormann, 2005). Rapsöl wird in erster Linie im Haushalt als Speiseöl eingesetzt. Darüber hinaus findet es zudem Anwendung in den Bereichen Medizin, Kosmetik, in der Technik, in der Industrie oder im Pflanzenschutz (Krist, 2013). Im Bereich Pflanzenschutz ist es bereits als Insektizid zugelassen und kann auch im ökologischen Landbau eingesetzt werden (BVL, 2023a). Nach Krist (2013) schont Rapsöl dabei Bestäuberinsekten und kann im Boden abgebaut werden. Aus diesem Grund ist auch eine mögliche Mehrfachbehandlung des Rapsöls denkbar. Mit einer Jodzahl von 94 bis 126 wird Rapsöl als halbtrocknendes Öl eingestuft (Firestone, 2013; Roth & Kormann, 2000). Hinsichtlich der Fettsäurezusammensetzung überwiegt beim Rapsöl, mit bis zu 67%, die einfach ungesättigte Ölsäure (Firestone, 2013). Nähere Informationen zur Fettsäurezusammensetzung, Jodzahl und Trocknungslevel vom Rapsöl sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Auch zu Rapsölen als Pflanzenschutzmittel wurden bereits einige Studien durchgeführt. So konnten beispielsweise Marčić et al. (2009) gegenüber *Myzus persicae* und Jaastad (2007) gegenüber *Myzus cerasi* durch den kurativen Einsatz von Rapsöl in unterschiedlichen Versuchen eine insektizide Wirkung aufzeigen. Darüber hinaus erzielten Beattie et al. (2002) durch eine Mehrfachbehandlung mit Rapsöl eine insektizide Wirkung gegenüber *Phyllocnistis citrella*. Dabei beruht die Wirkung des Rapsöls überwiegend auf einem dünnen Ölfilm, der die Insekten überzieht und diese erstickt (Roth & Kormann, 2000). Diese Erkenntnisse unterstreichen, dass auch das Rapsöl, als halbtrocknendes glyceridisches Pflanzenöl, weiterhin ein hohes Potenzial besonders als Insektizid aufweist.

1.3 Phytotoxizität von Pflanzenölen

Baker (1970) fasste zusammen, dass die Toxizität von Ölen im Allgemeinen von mehreren Faktoren abhängt. Eine Rolle spielt unter anderem der Anteil niedrigsiedender Verbindungen, der Anteil ungesättigter Verbindungen sowie der Anteil an Aromaten und Säuren eines Öls. Je höher die Konzentrationen dieser Bestandteile, umso höher ist der toxische Effekt des jeweiligen Öls. Zudem hängt nach Baker (1970) die Wirkung der Öle auf die Pflanze auch mit der genauen Zusammensetzung des jeweiligen Öls, der ausgebrachten Ölmenge, den Umweltbedingungen während der Behandlung und der zu behandelnden Pflanzenart zusammen. Bereits frühzeitig erwähnten auch Deong et al. (1927), dass beispielsweise Baumwollsaamenöl, Leinöl und Rizinusöl eine phytotoxische Wirkung aufzeigten, und führten diese Erkenntnis ebenfalls auf die Fettsäurezusammensetzung und den hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren in den jeweiligen Ölen zurück. Auch Havis (1950) vermutete, dass die ungesättigten Verbindungen verantwortlich für toxische Wirkungen seien. Durch einen gezielten Einsatz von hohen Ölkonzentrationen kann somit möglicherweise eine herbizide Wirkung hervorgerufen werden. Darüber hinaus stellten Cohen et al. (1991) fest, dass, im Vergleich zu mehreren untersuchten mehrfach ungesättigten Fettsäuren, die einfach ungesättigte Ölsäure eine geringere phytotoxische Wirkung aufwies.

Die in diesen Versuchsreihen verwendeten Pflanzenöle, Tungöl, Leinöl und Rapsöl, weisen unterschiedliche Fettsäurezusammensetzungen auf (vgl. Tabelle 1). Das Tungöl enthält bis zu ca. 80% die dreifach ungesättigte α -Elaeostearinsäure, bis zu ca. 12% die zweifach ungesättigte Linolsäure sowie bis zu ca. 15% die einfach ungesättigte Ölsäure. Die Fettsäurezusammensetzung des Leinöls besteht hingegen überwiegend aus der dreifach ungesättigten Linolensäure (bis zu 66%) und der einfach ungesättigten Ölsäure (bis zu 39%). Demgegenüber enthält das halbtrocknende Rapsöl überwiegend die einfach ungesättigte Ölsäure (bis zu 67%) und bis zu 25% die zweifach ungesättigte Linolsäure (Firestone, 2013; Suresh et al., 2019).

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es bei der Verwendung von Pflanzenölen im Pflanzenschutz sehr bedeutsam, auf die Konzentrationen der eingesetzten Öle bzw. auf die Ölmengen zu achten. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit zunächst Versuche zur phytotoxischen Wirkung der glyceridischen Pflanzenöle durchgeführt, um für die darauffolgenden Versuchsreihen entsprechende Ölkonzentrationen zu ermitteln, die für die zu behandelnden Pflanzen keine phytotoxischen Effekte aufwiesen.

1.4 Spektroskopie

Durch die Methode der bildgebenden Spektroskopie besteht die Möglichkeit, den spektralen Charakter und die räumliche Verteilung z.B. von Wasser und Chlorophyll in Pflanzen zu untersuchen (Smolyar, 2003) und somit Informationen über den Zustand einer Pflanze zu erfahren (Schaumberger et al., 2015). Mittels Spektrometrie kann die von den Pflanzen reflektierte elektromagnetische Strahlung (Schaumberger et al., 2015) bzw. Licht (Smolyar, 2003) anhand von spektralen Signaturen gemessen werden (Schaumberger et al., 2015). Mahlein et al. stellten 2018 dar, dass für eine Interpretation von Signalen entlang des elektromagnetischen Spektrums ein Verständnis über die Wechselwirkung von Licht mit einer Pflanze unerlässlich ist. Mahlein et al. (2018) resümierten die Erkenntnisse aus unterschiedlichen Veröffentlichungen. Sie fassten dementsprechend zusammen, dass Licht, das auf Pflanzen trifft, im Allgemeinen entweder das Blatt durchquert (Transmission), von bestimmten Stoffen im Blatt (z.B. Pigmente, Wasser, Zucker, Lignin, Aminosäuren) absorbiert wird (Absorption) oder von Strukturen der Blattoberfläche reflektiert (Reflexion) wird. Das Ergebnis einer spektroskopischen Messung, die spektrale Signatur, stellt folglich den Anteil der absorbierten, transmittierten und reflektierten elektromagnetischen Strahlung über einen bestimmten Wellenlängenbereich hinweg dar. Insgesamt wird zwischen unterschiedlichen Wellenlängenbereichen unterschieden. Man differenziert vorwiegend zwischen der ultravioletten (UV) Spektroskopie (200 nm–350 nm), der sichtbaren (visible = VIS) Spektroskopie (350 nm–700 nm) und der Infrarotspektroskopie (IR) ab 700 nm mit dem Nahinfrarotbereich (NIR) von 700 nm bis 2500 nm (Jespersen, 2006).

Die spektrale Signatur unterscheidet sich je nach Wellenlängenbereich. Diese Bereiche geben Auskunft über beispielsweise die Pigmentkonzentrationen einer Pflanze (z.B. Informationen zum Chlorophyllgehalt), die Nährstoffversorgung, den Wassergehalt, die Biomasse oder geben Informationen bezüglich Stressindikatoren (Schaumberger et al., 2015). Die in den Pflanzen enthaltenen Pigmente dienen u.a. der Absorption und Umwandlung von Strahlung bestimmter Wellenlängen z.B. für die Photosynthese (Smolya, 2003) oder auch zum Schutz bei schädigender Strahlung (Tanaka et al., 2008). Jedes Pigment besitzt verschiedene spektrale Absorptionseigenschaften, die sogenannten charakteristischen Absorptionsspektren (Raven et al., 2006; Smolyar, 2003).

1.4.1 Vegetationsindices

Vegetationsindices (VI) wurden überwiegend für die Fernerkundung, zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Vegetation, anhand von Spektralmessungen entwickelt. VI können Informationen über eine Vielzahl verschiedener Pflanzenparameter liefern und können mithilfe verschiedener mathematischer Operationen anhand von Reflexionsspektren berechnet werden (Bannari et al., 1995). Sie beinhalten die Information einzelner Wellenlängen des Reflexionsspektrums einer Vegetation, die z.B. von Pigmenten (Blackburn, 1998) oder vom Wassergehalt (Peñuelas et al., 1993) beeinflusst werden. Die Konzentration einzelner Pigmente in der Vegetation kann anhand von Reflexionsspektren abgeschätzt werden und bietet somit Potenzial für den Einsatz zur Bewertung des physiologischen Zustands einer Pflanze, der Produktivität einer Pflanze (Blackburn, 1998) oder auch zur indirekten Erkennung von Pflanzenkrankheiten (Mahlein et al., 2013). Besonders die Erkennung und Quantifizierung von Krankheiten mit Hilfe von bildgebenden und nicht-bildgebenden Sensoren hat sich in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt und an Bedeutung gewonnen (Del Ponte et al., 2024).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folglich Spektrometer eingesetzt, um die Versuchspflanzen nach den Ölbehandlungen näher zu untersuchen. Um Informationen über den physiologischen Zustand der behandelten Pflanzen zu erlangen, wurden die folgenden VI näher betrachtet.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ist der häufigste verwendete VI und vergleicht die Reflexion im sichtbaren Bereich mit der im nahinfraroten Wellenlängenbereich (Gamon et al., 1995; Rouse et al., 1974). Gesundes Blattgewebe absorbiert zur Durchführung der Photosynthese und der Chlorophyllherstellung vorwiegend im blauen und roten Wellenlängenbereich (450 nm & 680 nm) (Hoffer & Johannsen, 1969; Smolyar, 2003) und reflektiert überwiegend im Nahinfrarotbereich (Hoffer & Johannsen, 1969; Peñuelas & Filella, 1998). Der NDVI ist ein nützlicher Indikator für die Schätzung des Chlorophyllgehalts, des Stickstoffgehalts, des Anteils der absorbierten PAR und der potenziellen photosynthetischen Aktivität (Gamon et al., 1995). Der NDVI lässt folglich Rückschlüsse über den Gesundheitszustand (Stamford et al., 2023) bzw. Stressstatus einer Pflanze zu. Damit einhergehend sind auch Rückschlüsse über die Photosyntheseleistung bzw. Ertragsleistung von Pflanzen (Stamford et al., 2023) sowie über den allgemeinen Zustand von Pflanzen möglich. Stamford et al. (2023) bezogen sich auf ältere Literaturquellen, fassten diese zusammen und ergänzten, dass NDVI-Werte auf einen Bereich von -1 bis 1 normiert werden, wobei positive Werte eine höhere Reflexion im NIR-Bereich als im roten Bereich anzeigen. Bei einer gesunden Vegetation ist die relative Absorption im roten Bereich durch Chlorophyll im Vergleich zum NIR-Bereich größer und die NDVI-Werte nähern sich dem Wert 1. Wenn der

Chlorophyllgehalt aufgrund von Stress oder Seneszenz jedoch abnimmt, nähert sich der NDVI-Wert aufgrund der geringeren Absorption von sichtbarem roten Licht dem Wert Null (Stamford et al., 2023). Hohe Werte suggerieren folglich einen hohen Chlorophyllgehalt bzw. eine hohe Pflanzengesundheit.

Greenness Index (G)

Der Greenness Index (G) kombiniert zwei Wellenlängen des grünen und roten Lichts (554 nm/ 677 nm) (Zarco-Tejada et al., 2005). Der Index beinhaltet Absorptionseigenschaften des Chlorophylls (Peñuelas & Filella, 1998) und dient damit u.a. der Erkennung von Stressfaktoren durch sich verändernde Chlorophyllgehalte (Yang et al., 2023). Im grünen Bereich um 554 nm ist die Absorption durch sämtliche Pigmente im Blatt geringer als im roten Bereich (Gitelson et al., 2009). Hingegen ist die Reflexion, vor allem von Chlorophyll (Rabideau et al., 1946), in diesem Bereich relativ hoch (Gitelson et al., 2009). Im roten Bereich wird die Wellenlänge um 677 nm durch Chlorophyll stark absorbiert (Rabideau et al., 1946). Sie besitzt folglich einen schwachen Zusammenhang zum Gehalt und kann als Referenz herangezogen werden. Insgesamt kann also festgehalten werden, dass bei hohen G-Werten ein hoher Chlorophyllgehalt angenommen werden kann, denn bei mittleren und hohen Chlorophyllkonzentrationen ist die Reflexion im Bereich der Wellenlänge 554 nm besonders hoch (Peñuelas & Filella, 1998). Zudem können folglich auch Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand von Pflanzen gezogen werden (Signorelli et al., 2023).

Photochemical Reflectance Index (PRI)

Der Photochemical Reflectance Index (PRI) beschreibt die Aktivität der Pigmente des Xanthophyll-Zyklus (Gamon & Surfus, 1999) durch zwei Wellenlängen des grünen Bereichs (531 nm & 570 nm) (Peñuelas et al., 1995). Bei einsetzendem Lichteinfluss ändert sich die Reflexion der Wellenlänge 531 nm durch die Umwandlung der Pigmente des Xanthophyll-Zyklus (Zeaxanthin-Antheraxanthin-Violaxanthin) (Gamon & Surfus, 1999; Peñuelas et al., 1995). Die Reflexion im Bereich der Wellenlänge 570 nm dient dabei als Referenz (Gamon & Surfus, 1999). Der PRI kann daher als Indikator für die photosynthetische Strahlungsausnutzung (Peñuelas et al., 1995) bzw. für die Bewertung der photosynthetischen Strahlungseffizienz (Garbulsky et al., 2011) herangezogen werden. Ein hoher PRI-Wert weist somit auf eine hohe photosynthetische Effizienz hin. Nach Thenot et al. (2002) kann der PRI auch als Indikator für Wasserstress verwendet werden. Dies gilt jedoch nur unter kontrollierten Bedingungen, bei geringem oder mäßigem Stress (Thenot et al., 2002). Zudem ergänzten Feng et al. (2017), dass der PRI als Grundlage für die Überwachung der Schwankungen der Blattfeuchte unter biotischem Stress (z.B. durch Pathogene) herangezogen werden kann.

Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1)

Der Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1) beschreibt den Anthocyangehalt von Blättern durch die Wellenlängen 550 nm (VIS) und 700 nm (NIR). Anthocyan-Pigmente absorbieren im Bereich der Wellenlänge 550 nm am höchsten, jedoch beeinflusst der Chlorophyllgehalt ebenfalls diese Wellenlänge. Der ARI1 wurde entwickelt, um den Chlorophyllanteil an der Reflexion in diesem Spektralbereich zu entfernen und den Anthocyananteil aus der Reflexion, über einen weiten Bereich des Pigmentgehalts, zu ermitteln (Gitelson et al., 2001). Anthocyanen wird die Eigenschaft zugeschrieben, die Photoinhibition unter Einfluss von Lichtstress zu verringern. Zudem können sie dazu beitragen, photooxidative Schäden zu reduzieren (Steyn et al., 2002). Da Anthocyane bei vielen Pflanzenarten als Indikatoren für Blattseneszenz und Stress dienen können, kann ihr Nachweis und ihre quantitative Bewertung wichtige Informationen über die Reaktion und Anpassung von Pflanzen an Umweltstress liefern (Gitelson et al., 2001). Der ARI1 dient demzufolge der Einschätzung der Stresseinwirkung auf die Pflanze.

Lichtenthaler Index 2 (Lic2) & Carter2 Index (Ctr2)

Der Lichtenthaler Index 2 (Lic2) wird durch die Wellenlängen 440 nm und 690 nm beschrieben (Lichtenthaler, 1996). Der Lic2 bezieht sich auf den Chlorophyllgehalt (Delalieux et al., 2009a) und dient der Stresserkennung von Blättern (Main et al., 2011). Der Carter2 (Ctr2) hingegen kombiniert die Wellenlängen 695 nm und 760 nm. Auch der Ctr2 dient als Index, um einen Hinweis auf Pflanzenstress zu geben (Carter, 1994). Delalieux et al. (2009a) zogen im Rahmen ihrer Untersuchungen beide VI (Lic2 & Ctr2) zur Ermittlung von biotischem Blattstress bei Apfelpflanzen unter Berücksichtigung der Blattphänologie heran. In dieser Studie wurden VI mit dem Ziel bewertet, den Nutzen für die genaue Beobachtung von spektralen Blattveränderungen, die durch Apfelschorf verursacht wurden, zu ermitteln. Delalieux et al. (2009a) stellten fest, dass in einem weit entwickelten Infektionsstadium die VI (R440/R690) und (R695/R760) eine bessere Unterscheidung zwischen nicht infizierten und infizierten Blättern zeigten. Sie schlussfolgerten, dass VI, die einen roten Wellenlängenbereich enthalten, was in Untersuchungen zum Chlorophyllgehalt ein wichtiges Kriterium darstellt, in späteren Infektionsstadien, wenn die Pigmente abgebaut werden und visuelle Symptome auftreten, an Bedeutung zu gewinnen scheinen.

MSI & weitere Indices im Nahinfrarotbereich

Die Wellenlängenverhältnisse im Nahinfrarotbereich 1480 nm/ 2135 nm (Delalieux et al., 2009b) und 1500 nm/ 2250 nm dienen der Erkennung von Stress in einem frühen Infektionsstadium (Delalieux et al., 2009a). Die Aussagekraft von VI ist je nach Dauer der Infektion unterschiedlich. VI mit der stärksten Aussagekraft, frühzeitig nach der Inokulation,

sind Wellenlängenverhältnisse, die sich aus Wellenlängen im vorherrschenden Wasserabsorptionsbereich zusammensetzen (Delalieux et al., 2009a). Das Reflexionsspektrum von Blättern wird im Wellenlängenbereich zwischen 1300 nm und 2600 nm maßgeblich durch den Wassergehalt beeinflusst (Hoffer & Johannsen, 1969). Ein Befall mit beispielsweise *Venturia inaequalis* führt nach einiger Zeit zu einer Beeinträchtigung der Kutikula und damit einhergehend zu einer erhöhten Transpiration. Nach einiger Zeit, sobald Schorfläsionen sichtbar werden, ist der Wasserhaushalt des Blattes nachweislich gestört (Oerke & Steiner, 2024). Oerke und Steiner (2024) konnten durch hyperspektrale Messungen zeigen, dass der verringerte Wassergehalt der Blätter ausschließlich auf die Stellen begrenzt war, an denen sich Konidiophoren entwickelten. Schon vor einiger Zeit untersuchten Hunt und Rock (1989) die Erkennung von Veränderungen des Wassergehalts in Blättern mit Hilfe von Nah- und Mittelinfrarotreflexionen. Hierzu zogen sie u.a. den Wasserindex, den Moisture Stress Index (MSI), heran. Mit einem Wellenlängenverhältnis von 1600 nm/ 820 nm dient der MSI lediglich der Schätzung des Wassergehalts (Ceccato et al., 2001).

1.5 Hypothesen

Aufgrund der allgemeinen Erkenntnisse zum physiologischen Zustand von Pflanzen, der beschriebenen Erkenntnis von Pflanzenölen und ihrer Wirkung auf den Zustand von Pflanzen und der bisher bekannten Wirkung bezüglich ihrer Phytotoxizität wurden die Hypothesen aufgestellt, dass die physiologische Wirkung trocknender Pflanzenöle auf Pflanzen von der Konzentration, Applikationsmenge sowie von zusätzlichen biotischen und abiotischen Stressfaktoren abhängt (**H1**) und, dass diese physiologische Wirkung mit Hilfe von Sensoren gemessen werden kann und sich in veränderten Vegetationsindices und Reflexionsmustern widerspiegelt (**H2**).

2 Material und Methoden

Um diese Hypothesen zur Wirkung der Pflanzenöle in Bezug auf die physiologische Wirkung zu untersuchen, wurden zum einen am Beispiel von Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) Versuche zur phytotoxischen Wirkung der Öle und Versuche unter Einfluss eines zusätzlichen abiotischen Stressfaktors, in diesem Fall UV-Licht, durchgeführt. Zum anderen wurden am Beispiel der bedeutenden Baumobstkultur Apfel (*Malus x domestica*) weitere Versuchsreihen mit Apfelsämlingen angelegt und erforscht. In diesen Versuchsreihen wurde die physiologische Wirkung der Öle sowohl nach Mehrfachbehandlung als auch nach einer Einfachbehandlung unter zusätzlichem Einfluss eines biotischen Stressfaktors, in diesem Fall einem Pathogen, dem Apfelschorf (*Venturia inaequalis*), untersucht. In allen Versuchsreihen

wurde, neben den Öl-Varianten, zusätzlich immer eine unbehandelte Kontrollgruppe (K) zum direkten Vergleich mitgeführt.

2.1 Versuche zur phytotoxischen Wirkung der Pflanzenöle an Buschbohnen

2.1.1 Pflanzenmaterial

Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) der Sorte „Saxa“ wurden in 10er Töpfen in kommerziellem Kultursubstrat (Profisubstrat, Einheitserde Classic, Typ ED 73 (Weißtorf (Hochmoortorf) und Lehm)) ausgesät. Im Anschluss wurden alle Töpfe auf Ebbe-Flut-Tischen im Gewächshaus am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn platziert. Die Anzucht der Buschbohnen erfolgte für drei Wochen unter kontrollierten Bedingungen ($18 \pm 1^\circ\text{C}$ in der Nacht und $20 \pm 2^\circ\text{C}$ am Tag, 12 h Licht pro Tag) und täglicher Bewässerung.

2.1.2 Herstellung der trocknenden Pflanzenöle

Die verwendeten Pflanzenöle wurden aus Samen von Lein (*Linum usitatissimum* L.), aus Kernen des Tungölbaums (*Aleurites fordii* H.) und Samen von Raps (*Brassica napus* L.) hergestellt. Diese Öle enthalten Triglyceride mit unterschiedlichen Zusammensetzungen von Fettsäuren. Leinöl und Tungöl enthalten einen hohen Anteil an 18:3-Fettsäuren, die für den trocknenden Charakter dieser Öle verantwortlich sind (Tabelle 1, Kapitel A 1.2). Insgesamt wurden zwei trocknende Pflanzenöle, Leinöl (L) und Tungöl (T) sowie das halbtrocknende Rapsöl (R) in den Versuchsreihen dieser Arbeit verwendet und untersucht. Die Verarbeitung und Formulierung dieser emulgierten trocknenden Pflanzenöle basiert auf einem Patent von Petry et al. (2017). „PETRYmade“ (Meckenheim, Deutschland) stellte die in den Versuchsreihen dieser Arbeit verwendeten Öle her.

Grundlage der in den Versuchsreihen verwendeten Ölpräparate sind Emulsionen der untersuchten Pflanzenöle in Wasser. Die einzelnen Pflanzenöle wurden unter Ausschluss von Sauerstoff langsam auf $230\text{--}280^\circ\text{C}$ erhitzt, um eine Säurezahl von unter 10 zu erreichen. Der genaue Temperaturanstieg, die Dauer und die Endtemperatur der Siedevorgänge sind von der jeweiligen Ölsorte abhängig. Die entstandenen Harze wurden abgekühlt und mit einem Emulgator von weniger als 5% versetzt, um die Harze wasserlöslich zu machen. Die Ausgangsemulsionen der Pflanzenöle enthielten 50% Wasser und 50% des jeweiligen reinen Pflanzenöls einschließlich des Emulgators. Weitere Details zur Herstellung können der Patentbeschreibung von Petry et al. (2017) entnommen werden. Die Ausgangsemulsion wurde anschließend mit Wasser auf die jeweilig gewünschte Testkonzentration verdünnt.

2.1.3 Versuchsdurchführung und Bewertung zur phytotoxischen Wirkung der Pflanzenöle an Buschbohnen

Die Applikation der verwendeten Pflanzenöle erfolgte in den Versuchsreihen zur phytotoxischen Wirkung an Buschbohnen einmalig mit Handsprühern gleichmäßig auf der abaxialen und adaxialen Seite von Primärblättern der Buschbohnen, bis zum Abtropfen. Verwendet wurden pro Variante jeweils einheitlich entwickelten, drei Wochen alten Buschbohnen. In Tabelle 2 sind alle Informationen der verwendeten Pflanzenöle, deren Abkürzungen und Ölkonzentrationen für die Untersuchungen zur phytotoxischen Wirkung aufgeführt.

Tabelle 2: Informationen über die getesteten Pflanzenöle, verwendeten Abkürzungen aller Behandlungsvarianten und über die getesteten Ölkonzentrationen der Untersuchungen zur phytotoxischen Wirkung der Pflanzenöle an Buschbohnen.

Pflanzenöl	Abkürzung	Gesamt-Öl-Konzentration ¹
Lein	L	0,5%, 1%, 2%, 5%
Raps	R	0,5%, 1%, 2%, 5%
Kontrolle	K	Wasser

¹ Finaler Ölgehalt in der Öl-Wasser-Emulsion.

Die Primärblätter der Buschbohnen wurden pro Behandlungsgruppe mit jeweils einer Konzentration (0,5%, 1%, 2% und 5%) von Leinöl und Rapsöl behandelt (Tabelle 2). Phytotoxische Effekte in Form von Blattschäden in Prozent wurden durch visuelle Untersuchung bewertet und mit einer Kontrolle verglichen. Zwölf Tage nach der Applikation wurden dementsprechend Fotos von den Blättern gemacht. Mit Hilfe der „Image Analysis Software (Assess 2.0)“ konnten anschließend die Blattschäden in Prozent ausgewertet werden (vgl. Tabelle 8).

2.2 Versuche zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Ölbehandlungen von Apfelsämlingen

2.2.1 Pflanzenanzucht

Die verwendeten Apfelsämlinge (*Malus x domestica*) der Sorte „Bittenfelder“ wurden in der Professur für Gartenbauwissenschaften des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn angezogen und nach Aussaat und Keimung in einer Saatschale zur Verfügung gestellt. Die Apfelsamen wurden dafür trocken und kalt bei 6°C im Dunkeln gelagert. Zur Keimung wurden die Samen zunächst über drei Tage unter täglichem Waschen mit Leitungswasser bei Zimmertemperatur vorgequellt. Bei der anschließenden vier- bis fünfwöchigen, nasskalten Stratifizierung bei 6°C wurden die Samen mit Kontaktfungizid behandelt, in Papierhandtücher eingewickelt und in Folienbeuteln gelagert. Die Aussaat als Breitsaat in einer Aussaatschale fand in Torfkultursubstrat-Sand-Gemisch (1:1) statt. Dazu

wurden die Samen flach ausgelegt, leicht angedrückt und mit Sand bedeckt. Die Schale wurde im Gewächshaus bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$ und tagesabhängigem Lichteinfluss (Februar – März) aufbewahrt. Drei Wochen nach Aussaat wurden die Apfelsämlinge in 10er Töpfen in kommerzielles Kultursubstrat (Profisubstrat, Einheitserde Classic, Typ ED 73 (Weißtorf (Hochmoortorf) und Lehm)) pikiert. Im Anschluss wurden alle Töpfe auf Ebbe-Flut-Tischen im Gewächshaus am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn platziert. Die weitere Anzucht der Apfelsämlinge erfolgte unter kontrollierten Bedingungen ($19,5 \pm 4,0^\circ\text{C}$, rF $55,0\% \pm 17,5\%$) und einer Bewässerung alle 12 h.

2.2.2 Versuchsdurchführung zur Mehrfachbehandlung an Apfelsämlingen

Die Applikation der verwendeten Pflanzenöle erfolgte in den Versuchsreihen zur physiologischen Pflanzenreaktion von Apfelsämlingen nach Mehrfachbehandlung mit Handsprühern gleichmäßig auf der abaxialen und adaxialen Seite der Blätter, bis zum Abtropfen. Die Herstellung der Öle erfolgte nach der Beschreibung in Kapitel A 2.1.2. Für jede Behandlungsgruppe wurden fünf Apfelsämlinge nach der Vereinzelung mit einer Anzahl von 21 ± 3 voll entfalteten und zwei nicht entfalteten Blättern bei einer Höhe von $21 \pm 3,5$ cm verwendet. Die kommerziellen Vergleichsprodukte wurden auf die gleiche Weise appliziert wie die Pflanzenöle, die Kontrollgruppe blieb hingegen unbehandelt. In Tabelle 3 sind alle Informationen der verwendeten Pflanzenöle, kommerziellen Produkte, Mischungen von Pflanzenölen mit kommerziellen Produkten, deren Abkürzungen und Ölkonzentrationen für die Untersuchungen zur physiologischen Pflanzenreaktion nach Mehrfachbehandlung aufgeführt.

Tabelle 3: Informationen über die getesteten Pflanzenöle, kommerziellen Produkte, Mischungen von Pflanzenölen mit kommerziellen Produkten, verwendeten Abkürzungen aller Behandlungsvarianten sowie über die getesteten Ölkonzentrationen und Wirkstoffe der kommerziellen Produkte der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Mehrfachbehandlung und Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress (*Venturia inaequalis*) an Apfelsämlingen.

Pflanzenöl	Abkürzung	Gesamt-Öl-Konzentration ¹
Lein	L1	1%
Lein	L2	2%
Tung	T1	1%
Tung	T2	2%
Mischung	Abkürzung	Gesamt-Öl-Konzentration ¹
Lein + Funguran® progress	L1Cu	1%
Lein + Funguran® progress	L2Cu	2%
Tung + Funguran® progress	T1Cu	1%
Tung + Funguran® progress	T2Cu	2%
Kommerzielles Produkt	Abkürzung	Wirkstoff
Funguran® progress	Cu	537 g/kg Cu(OH) ₂
Micula®	Mi	85% emulgiertes Rapsöl
Kontrolle	K	-

¹ Finaler Ölgehalt in der Öl-Wasser-Emulsion.

Anschließend wurden die Versuchspflanzen in wöchentlichem Abstand an drei weiteren Terminen behandelt (7, 14, 21 Tage nach erster Behandlung (TneB)). Über den gesamten Versuchszeitraum dienten zur Untersuchung, die während der ersten Behandlung jüngste voll entfaltete Blattetage und die darunterliegenden folgenden drei Blattetagen. Die Anordnung der Varianten auf den Tischen erfolgte dabei in randomisierter Form, um mögliche Randeffekte und etwaige weitere Einflüsse auszuschließen. Zeitlich versetzt zu den Behandlungen fanden regelmäßige Spektralmessungen mittels PolyPen RP 400 (Photon Systems Instruments) und QualitySpec Trek (Malvern Panalytical) statt.

Spektralmessungen und Auswertung zur Mehrfachbehandlung an Apfelsämlingen

Zur Beurteilung des Einflusses der mehrfachen Ölbehandlungen von Apfelsämlingen wurden regelmäßige Spektralmessungen mit den Spektrometern PolyPen RP 400 (PP) und QualitySpec Trek (QST) durchgeführt. Der PolyPen RP 400 ist ein Handmessgerät der Firma Photon Systems Instruments mit einem Spektralbereich von 380 nm-790 nm. Beim PP diente der zugehörige, am Sensor befestigte schwarze Clip als Referenzmessung und als allgemeiner Messhintergrund. Der ASD QualitySpec Trek ist hingegen ein tragbares Spektrometer der Firma Malvern Panalytical mit einem Spektralbereich von 350 nm-2500 nm. Beim QST wurden am Sensor zehn Wiederholungen je Messung eingestellt, die durch den Sensor automatisch zu einem Mittelwert verrechnet wurden. Für den Messhintergrund lag dem QST ein schwarzer Clip bei. Der Clip hatte durch eine magnetische Befestigung jedoch destruktive Auswirkungen auf die Blätter, sodass dieser für die Messungen im Rahmen der hier durchgeführten Versuche nicht eingesetzt werden konnte. Für die hier aufgeführten Messungen kam daher ein schwarzer Handschuh als Messhintergrund zum Einsatz, sodass die destruktiven Auswirkungen vermieden werden konnten.

Die Messungen fanden dabei jeweils auf der adaxialen Blattseite statt. Der Messpunkt lag jeweils an der breitesten Stelle eines Blattes zwischen Blattader und Blattrand. Mit beiden Sensoren erfolgte jeweils eine Messung pro Blatt, wobei die Messungen insgesamt an vier Blättern von jeweils sechs Pflanzen einer Variante durchgeführt wurden. Zur Datenerhebung dienten über den gesamten Versuchszeitraum die während der ersten Behandlung jüngste voll entfaltete Blattetage und die darunterliegenden drei Blattetagen. Die Spektralmessungen fanden mittels PolyPen RP 400 (PP) und QualitySpec Trek (QST) 1, 4, 8, 10, 15, 17, 22 und 24 TneB statt. Die Spektraldaten wurden anschließend in Form von Vegetationsindices verrechnet. In Tabelle 4 sind alle Vegetationsindices aufgelistet, die für die Versuchsreihe der physiologischen Pflanzenreaktion nach Mehrfachbehandlung an Apfelsämlingen im Anschluss betrachtet wurden.

Tabelle 4: Verwendete spektrale Vegetationsindices der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen von Apfelsämlingen nach Mehrfachbehandlung mit den Pflanzenölen.

Vegetationsindex (Abkürzung)	Formel	Quelle
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})^1$	(Rouse et al., 1974)
Greenness Index (G)	R_{554} / R_{677}	(Zarco-Tejada et al., 2005)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	(nach Peñuelas et al., 1995)
Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1)	$1 / R_{550} - 1 / R_{700}$	(Gitelson et al., 2001)
Moisture Stress Index (MSI)	R_{1600} / R_{820}	(Hunt & Rock, 1989)

¹In diesen Untersuchungen wurde für RED = 630 und für NIR = 780 verwendet.

2.2.3 Versuchsdurchführung zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress an Apfelsämlingen

Die Applikation der verwendeten Pflanzenöle erfolgte in den Versuchsreihen zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress an Apfelsämlingen, wenn nicht anders erwähnt, einmalig mit Handsprühern gleichmäßig auf der abaxialen und adaxialen Seite der Blätter, bis zum Abtropfen. Die Herstellung der Öle erfolgte nach der Beschreibung in Kapitel A 2.1.2. Verwendet wurden, je Behandlungsvariante, sechs Apfelsämlinge nach der Vereinzelung mit sieben vollständig und zwei unvollständig entfalteten Blättern bei einer Höhe von $10 \pm 1,6$ cm. Die kommerziellen Vergleichsprodukte wurden auf die gleiche Weise appliziert wie die Pflanzenöle, die Kontrollgruppe blieb hingegen unbehandelt. Für die Versuchsreihen zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress wurden dieselben Behandlungsvarianten eingesetzt, wie in den Versuchen zur Mehrfachbehandlung (Tabelle 3, Kapitel A 2.2.2). In Tabelle 3 sind alle Informationen der verwendeten Pflanzenöle, kommerziellen Produkte, Mischungen von Pflanzenölen mit kommerziellen Produkten, deren Abkürzungen und Ölkonzentrationen für diese Untersuchungen aufgeführt.

Um zusätzlich zur einfachen Ölbehandlung biotischen Stress zu simulieren, wurden die Apfelsämlinge jeweils einen Tag nach Behandlung inokuliert. Von der Pflanzenpathologie des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn wurden eine Konidien suspension mit *Venturia inaequalis* sowie mit *Venturia inaequalis* befallene Blätter zur Verfügung gestellt. Diese wurden bei -20°C gelagert. Zur Suspensionsherstellung wurden aufgetaute Blätter mit Wasser-Tween®-Gemisch (Tween® 20 (Merck Group, Darmstadt)) (0,01%) abgewaschen. Für die Inokulation wurde die abgewaschene Suspension mit einem Hämozytometer und unter weiterer Zugabe des Wasser-Tween®-Gemischs auf eine Sporendichte von 6×10^4 Sporen mL⁻¹ eingestellt. Die Verwendung von Tween® sorgt für eine Verringerung der Verklumpung der Sporen in der Suspension durch ihre hydrophobe Oberfläche. Hierdurch ist eine bessere Ermittlung der Sporendichte der abgewaschenen Suspension sowie eine gleichmäßigere Verteilung der Sporen auf den Blättern möglich. Bei

der Inokulation wurden die Apfelblätter der Sämlinge mit der Sporensuspension mit Handsprühern eingesprüht. Es wurde darauf geachtet, dass eine gleichmäßige Verteilung der Sporensuspension erfolgte. Die Inkubation erfolgte anschließend für 48 h bei 20°C und 100% Luftfeuchtigkeit. Insgesamt wurde die Applikation der Öle und die Pathogeninokulation für alle Varianten gleich durchgeführt. Nach der Inkubation wurden die behandelten und inokulierten Apfelsämlinge unter denselben Bedingungen wie zur Aufzucht (Kapitel A 2.2.1) auf den Ebbe-Flut-Tischen im Gewächshaus platziert. Die Anordnung der Varianten auf den Tischen erfolgte dabei in randomisierter Form, um mögliche Randeffekte und etwaige weitere Einflüsse auszuschließen. Anschließend fanden Bonituren des Schadbildes und regelmäßige Spektralmessungen mittels QualitySpec Trek (QST) statt.

Bonituren und Bewertung des Schadbildes zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress an Apfelsämlingen

Zur Beurteilung des Einflusses einer einmaligen Ölbehandlung in Kombination mit einem zusätzlichen biotischen Stressfaktor, in diesem Fall dem Pathogen *Venturia inaequalis*, wurde ein Boniturschema erstellt. In Tabelle 5 ist das hierfür verwendete Boniturschema dargestellt. Die verwendete Sorte Bittenfelder Sämlinge weist eine hohe Widerstandskraft gegenüber Krankheiten auf (KOB, 2023). Durch diese Sortenwahl sollte ein hoher zwischen den Varianten nicht differenzierbarer Befall umgangen und die Bonitur des Schadbildes erleichtert werden.

Für die Bonitur des Schadbildes wurde blattweise die prozentual beschädigte Fläche anhand des in Tabelle 5 dargestellten Boniturschemas ermittelt. Die Bonituren des jeweiligen Schadbildes an den Apfelsämlingen erfolgten an vier Blättern von jeweils sechs Pflanzen einer Variante. Zur Untersuchung dienten dabei über den gesamten Versuchszeitraum die während der Behandlung jüngste voll entfaltete und die darunterliegende Blattoberseite. Die Bonituren fanden an sechs Terminen statt (14, 17, 21, 24, 28 und 31 Tage nach Behandlung (TnB)).

Tabelle 5: Boniturschema zur Bewertung des Schadbildes an Blättern der Apfelsämlinge im Rahmen der Untersuchungen zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress (*Venturia inaequalis*).

Boniturstufe	Erläuterung Schadbild	Optisches Schadbild
1	kein Schadbild	
2	leichte Flecken	
3	deutliche Flecken mit bräunlicher Färbung	
4	leichtes Schadbild, vornehmlich auf den Blattadern	
5	Ausbreitung des Schadbildes in angrenzendes Blattgewebe (< 10%)	
6	10-24% des Blattes beschädigt	
7	25-49% des Blattes beschädigt	
8	50-74% des Blattes beschädigt	
9	75-100% des Blattes beschädigt	im Versuch nicht aufgetreten

Zur Beurteilung der Stärke des Schadbildes der einmalig behandelten und inokulierten Apfelsämlinge wurde anschließend der Schadensindex (SI) für die physiologischen Schäden in Anlehnung an den Disease-Index (Cao et al., 2013; Feng et al., 2017) berechnet. Dabei ist n der Wert der höchsten Boniturstufe, i beschreibt den Wert der einzelnen Boniturstufen und f_i ist die Anzahl der Blätter, die einer Boniturstufe zugeordnet wurden. Der SI wurde einzeln für jeden Apfelsämling berechnet. Die Werte können somit zwischen 0 und 100 liegen.

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n (i-1)f_i}{(n-1)\sum_{i=1}^n f_i} \times 100$$

(Cao et al., 2013; Feng et al., 2017)

Spektralmessungen und Auswertung zur Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress an Apfelsämlingen

Zur Beurteilung des Einflusses der einmaligen Ölbehandlungen in Kombination mit biotischem Stress wurden zusätzlich zu den Bonituren regelmäßige Spektralmessungen mit dem QST durchgeführt. Beim QST wurden zehn Wiederholungen je Messung eingestellt, die durch den Sensor automatisch zu einem Mittelwert verrechnet wurden. Der dem QST beiliegende schwarze Clip für den Messhintergrund wurde auch in diesen Versuchsreihen nicht verwendet. Durch seine destruktiven Auswirkungen auf die Blätter, kam daher auch in diesen Versuchen ein schwarzer Handschuh als Messhintergrund zum Einsatz (vgl. Kapitel A 2.2.2).

Die Messungen fanden jeweils auf der adaxialen Blattseite statt. Der Messpunkt lag dabei jeweils an der breitesten Stelle eines Blattes zwischen Blattader und Blattrand, jedoch nicht direkt auf nekrotischem Gewebe. Mit dem QST erfolgte jeweils eine Messung pro Blatt, wobei die Messungen insgesamt an vier Blättern von jeweils sechs Pflanzen einer Variante durchgeführt wurden. Zur Datenerhebung dienten dabei über den gesamten Versuchszeitraum die während der Behandlung jüngste voll entfaltete und die darunterliegende Blattetage. Die Spektralmessungen wurden 10, 14, 17, 21, 24, 28 und 31 TnB durchgeführt. Die Spektraldaten wurden anschließend in Form von Vegetationsindices verrechnet. In Tabelle 6 sind alle Vegetationsindices aufgelistet, die für die Versuchsreihe der physiologischen Pflanzenreaktion nach Einfachbehandlung mit den Ölen in Kombination mit biotischem Stress an Apfelsämlingen im Anschluss betrachtet wurden.

Tabelle 6: Verwendete spektrale Vegetationsindices der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen von Apfelsämlingen nach Einfachbehandlung mit den Pflanzenölen in Kombination mit biotischem Stress (*Venturia inaequalis*).

Vegetationsindex (Abkürzung)	Formel	Quelle
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})^1$	(Rouse et al., 1974)
Greenness Index (G)	R_{554} / R_{677}	(Zarco-Tejada et al., 2005)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	(nach Peñuelas et al., 1995)
Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1)	$1 / R_{550} - 1 / R_{700}$	(Gitelson et al., 2001)
Lichtenthaler Index 2 (Lic2)	R_{440} / R_{690}	(Lichtenthaler, 1996)
Carter2 (Ctr2)	R_{695} / R_{760}	(Carter, 1994)
1480/2135	R_{1480} / R_{2135}	(nach Delalieux, 2009b)
1500/2250	R_{1500} / R_{2250}	(nach Delalieux, 2009a)
Moisture Stress Index (MSI)	R_{1600} / R_{820}	(Hunt & Rock, 1989)

¹In diesen Untersuchungen wurde für RED = 630 und für NIR = 780 verwendet.

2.3 Versuche zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Ölbehandlungen von Buschbohnen

2.3.1 Pflanzenanzucht

Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) der Sorte „Saxa“ wurden in 10er Töpfen in kommerziellem Kultursubstrat (Profisubstrat, Einheitserde Classic, Typ ED 73 (Weißtorf (Hochmoortorf) und Lehm)) ausgesät. Im Anschluss wurden alle Töpfe auf Tischen im Gewächshaus am Gartenbauinstitut der Universität Bonn platziert. Die Anzucht der Buschbohnen erfolgte für drei Wochen unter kontrollierten Bedingungen ($24 \pm 3^\circ\text{C}$ Durchschnitt Tag und Nacht, 12 h Licht pro Tag) und täglicher Bewässerung. Insgesamt wurde eine ausreichende Anzahl an Töpfen ausgesät, um einen Versuchsumfang von 40 einheitlich entwickelten Pflanzen zu erreichen.

2.3.2 Versuchsdurchführung zur Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress an Buschbohnen

Die Applikation der verwendeten Pflanzenöle erfolgte in den Versuchsreihen zur physiologischen Pflanzenreaktion von Buschbohnen nach Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress ebenfalls einmalig mit Handsprühern gleichmäßig auf der abaxialen und adaxialen Seite von Primärblättern der Buschbohnen, bis zum Abtropfen. Als abiotischer Stressfaktor kam der Einfluss von zusätzlichem UV-Licht zum Einsatz. Die Herstellung der Öle erfolgte nach der Beschreibung in Kapitel A 2.1.2. Verwendet wurden in diesen Versuchen pro Variante jeweils die zwei Primärblätter von zehn einheitlich entwickelten, drei Wochen alten Buschbohnen. Das Tungöl und das kommerzielle Vergleichsprodukt CutiSan® wurden auf die gleiche Weise appliziert, die Kontrollgruppe blieb hingegen unbehandelt. In Tabelle 7 sind alle

Informationen des verwendeten Pflanzenöls und des kommerziellen Produkts für diese Untersuchungen aufgeführt.

Tabelle 7: Informationen über das getestete Pflanzenöl, das verwendete kommerzielle Produkt sowie über die getestete Ölkonzentration und den Wirkstoff des kommerziellen Produktes der Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen nach Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress (UV-Licht) an Buschbohnen.

Pflanzenöl	Gesamt-Öl-Konzentration
Tung	2%
Mischung	Gesamt-Öl-Konzentration¹
Tung + CutiSan®	2%
Kommerzielles Produkt	Wirkstoff
CutiSan®	hochreines, feinstvermahlenes Kaolin
Kontrolle	-

In dieser Versuchsreihe wurde das kommerzielle Produkt CutiSan® zum Vergleich herangezogen. Bei dem Produkt CutiSan® handelt es sich um hochreines, fein vermahlenes Kaolin. Es findet überwiegend Anwendung zum Schutz vor Sonnenbrand in unterschiedlichen Kulturen (Biofa, 2023a). Zusätzlich wurde zum Vergleich eine unbehandelte Kontrolle herangezogen.

Nach der Ölbehandlung wurde je Variante eine Hälfte der Versuchspflanzen (fünf Pflanzen) für 13 Tage in einer UV-Kammer platziert. Die andere Hälfte der Buschbohnen wurde außerhalb der UV-Kammer im selben Gewächshaus aufgestellt. Für alle 40 Pflanzen galten somit zunächst weiterhin dieselben kontrollierten Gewächshausbedingungen wie zur Pflanzenanzucht (Kapitel A 2.3.1). Die fünf Pflanzen je Variante innerhalb der UV-Kammer wurden im Anschluss täglich für 6 h im Durchschnitt einer zusätzlichen UV-A / UV-B Intensität von 21,86 W/m² ausgesetzt. An mehreren Tagen nach Behandlung wurden alle Versuchspflanzen innerhalb und außerhalb der UV-Kammer mit dem PolyPen RP 400 (PP) gemessen.

Spektralmessungen und Auswertung zur Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress an Buschbohnen

Zur Beurteilung des Einflusses der einfachen Ölbehandlungen von Buschbohnen in Kombination mit abiotischen Stress, in Form von zusätzlichem UV-Licht, wurden regelmäßige Spektralmessungen mit dem PP durchgeführt. Beim PP diente auch in dieser Versuchsreihe der zugehörige, am Sensor befestigte schwarze Clip als Referenzmessung und als Messhintergrund. Die Messungen fanden dabei jeweils auf der adaxialen Blattseite statt. Der Messpunkt lag jeweils an der breitesten Stelle eines Primärblattes zwischen Blattader und Blattrand. Mit dem PP erfolgte jeweils eine Messung pro Primärblatt, wobei die Messungen

insgesamt an zwei Primärblättern von jeweils fünf Pflanzen einer Variante durchgeführt wurden. Zunächst wurden alle fünf Pflanzen je Variante außerhalb der UV-Kammer und anschließend die fünf Pflanzen je Variante in der UV-Kammer gemessen. Die Spektralmessungen fanden mittels PP regelmäßig über einen Zeitraum von 13 Tagen statt. Anschließend wurden die Reflexionsspektren der unterschiedlich Varianten nach 13 Tagen ausgewertet.

2.4 Statistische Auswertung

In den Liniendiagrammen (Abbildung 4-22) sind die Daten der oben aufgeführten Versuche zur Mehrfach- und Einfachbehandlung als Mittelwert pro Variante dargestellt. Die Anzahl der Wiederholungen (n) ist jeweils unter den Abbildungen mit angegeben. Die Varianzanalyse (ANOVA) wurde verwendet, um die Mittelwerte der Behandlungen zu vergleichen. Bei gegebener Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test) und Homoskedastizität (Levene-Test) wurde ein Tukey-HSD-Test als Post-hoc-Verfahren zur Bestimmung homogener Untergruppen bei einem p-Wert von $p \leq 0,05$ verwendet. Daten, die nicht der Homogenität der Varianz oder der Normalverteilung entsprachen, wurden mit dem Games-Howell-Test bei einem p-Wert von $p \leq 0,05$ analysiert. Alle statistischen Analysen wurden mit der Software IBM SPSS 25.0 durchgeführt. Signifikante Unterschiede wurden dabei durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet. Konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, so wurde dies mit nicht signifikant (n.s.) kenntlich gemacht.

Im Liniendiagramm (Abbildung 23) sind die Daten des oben aufgeführten Versuchs zur Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress als Mittelwert pro Variante dargestellt. Die Anzahl der Wiederholungen (n) ist jeweils unter den Abbildungen mit angegeben.

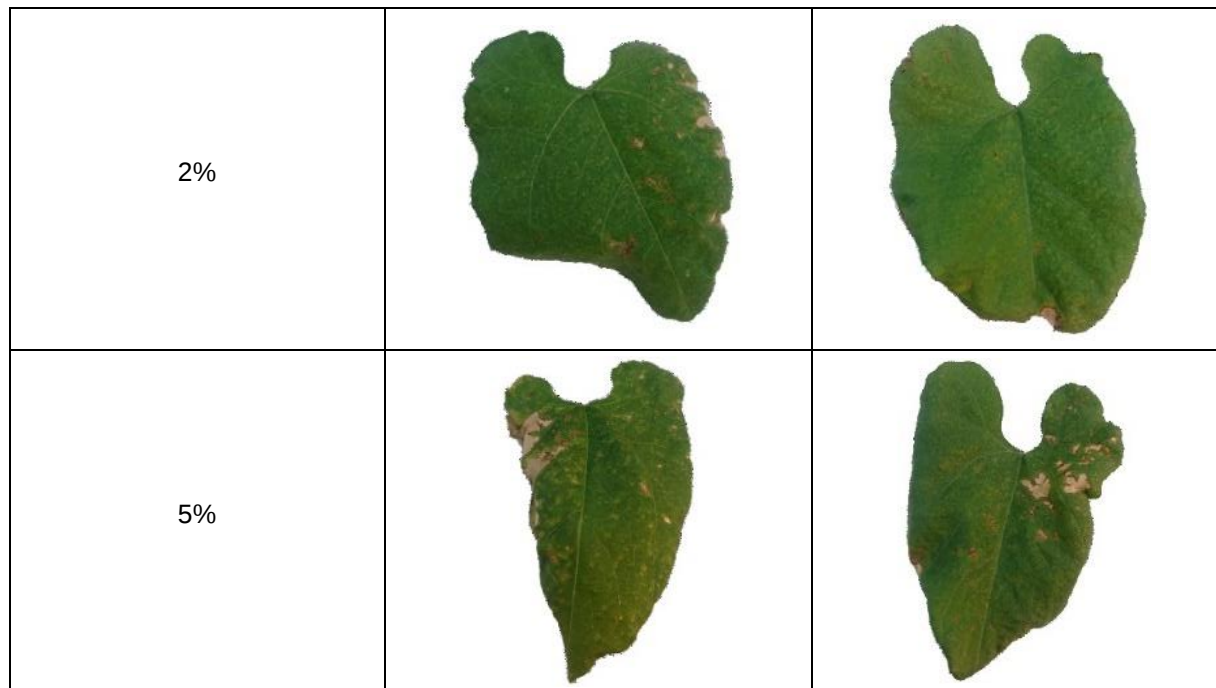
3 Ergebnisse

3.1 Phytotoxische Wirkung der Öle an Buschbohnen

Die Versuchsreihen zur phytotoxischen Wirkung wurde zu Beginn aller Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden vier verschiedene Konzentrationen (0,5%, 1%, 2% und 5%) des trocknenden Leinöls (L) und des halbtrocknenden Rapsöls (R) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (K) getestet, um mögliche schädigende Wirkungen der neuen Pflanzenölpräparate auf die empfindlichen Primärblätter von Buschbohnen zu untersuchen. Die visuellen Blattschäden einer exemplarischen Auswertung sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Sichtbare Blattschäden an Primärblättern von Buschbohnen, die mit unterschiedlichen Ölkonzentrationen von Leinöl und Rapsöl behandelt wurden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle im Rahmen der Untersuchungen zur phytotoxischen Wirkung der Öle an Buschbohnen.

Ölkonzentration [%]	Kontrolle	
0%		
Ölkonzentration [%]	Leinöl	Rapsöl
0,5%		
1%		



Die phytotoxischen Wirkungen der eingesetzten Pflanzenöle wurden mit der „Image Analysis Software (Assess 2.0)“ ausgewertet und als Blattschäden in Prozent dargestellt (Abbildung 1). Bis zu einer Konzentration von 1% beider Öle waren die Blattschäden kleiner als 0,5% und vergleichbar mit denen der Kontrolle. Bei einer Konzentration von 2% war die Blattschädigung bei beiden Ölen kleiner als 5%. Erst bei einer Ölkonzentration ab 5% traten Blattschäden von mehr als 8% beim halbtrocknenden Rapsöl und von 14% beim trocknenden Leinöl auf (vgl. Tabelle 8 und Abbildung 1).

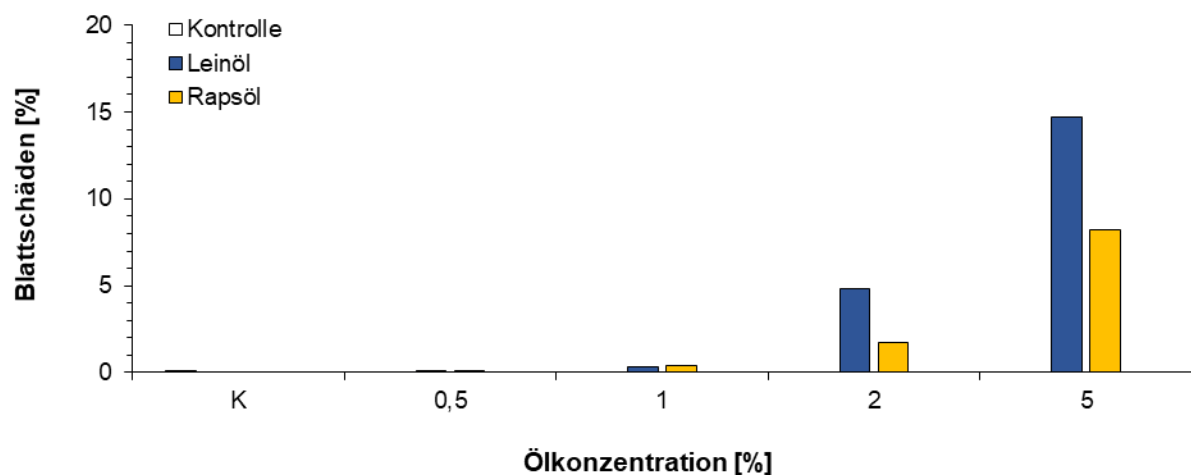


Abbildung 1: Phytotoxische Wirkung (Blattschäden in %) in Abhängigkeit von der Ölkonzentration (Leinöl = blau; Rapsöl = gelb) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (weiß), n = 1. Prozentuale Darstellung der sichtbaren Blattschäden der Blätter aus Tabelle 8.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden, für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen, überwiegend zweiprozentige Ölkonzentrationen eingesetzt. In einigen

Versuchsreihen mit entsprechenden Fragestellungen oder anderen Kulturen wurden auch Konzentrationen zwischen 0,5% und 5% herangezogen. Entsprechende Angaben finden sich in den jeweiligen Versuchsbeschreibungen.

3.2 Physiologische Pflanzenreaktionen nach Ölbehandlungen

3.2.1 Spritzbelag der Öle auf Apfelsämlingen

In Abbildung 2 sind die Tropfengröße und Verteilung der Tropfen auf der Blattoberfläche der Apfelsämlinge im Rahmen der Versuchsreihe der Mehrfachbehandlung dargestellt. Abgebildet sind die behandelten Blätter unmittelbar im Anschluss an die zweite Behandlung (7 TneB). Die auf die Blattoberfläche von Apfelsämlingen applizierten Pflanzenöle (L, T) und die jeweiligen Mischungen mit dem Fungizid (Cu) zeigten im optischen Vergleich zum Fungizid (Cu) alleine unterschiedliche Tropfengrößen. Die Cu-Variante wies hierbei eine feinere Verteilung und geringere Größe der Tropfen auf (Abbildung 2a). Im direkten Vergleich zwischen den reinen Ölbehandlungen und den Mischungen der Öle mit Kupfer waren keine optischen Unterschiede in der Verteilung oder Größe der Tropfen zu erkennen.

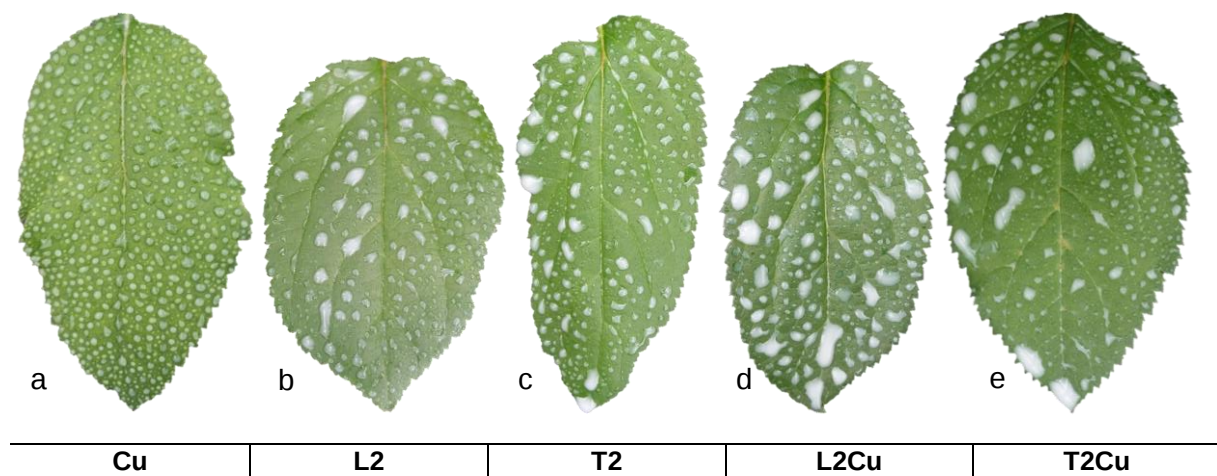


Abbildung 2: Tropfengröße und Verteilung der Pflanzenöle im Vergleich zum eingesetzten Fungizid auf der Blattoberfläche von Apfelsämlingen aus der Versuchsreihe zur Mehrfachbehandlung; dokumentiert unmittelbar im Anschluss an die zweite Behandlung (7 TneB); T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentration = 2%), Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer).

In Abbildung 3 ist der abgetrocknete Spritzbelag auf der Blattoberfläche der Apfelsämlinge aus der Versuchsreihe der Mehrfachbehandlung dargestellt. Abgebildet sind die behandelten Blätter im Anschluss an die vierte Behandlung (21 TneB). Die applizierten Pflanzenöle (L, T) bildeten auf den Blattoberflächen, wie in der Literatur beschrieben, durch Trocknung eine dünne Schicht (Abbildung 3c & d). Die Cu-Variante führte hingegen zu einem weiß-gräulichen Spritzbelag (Abbildung 3b).

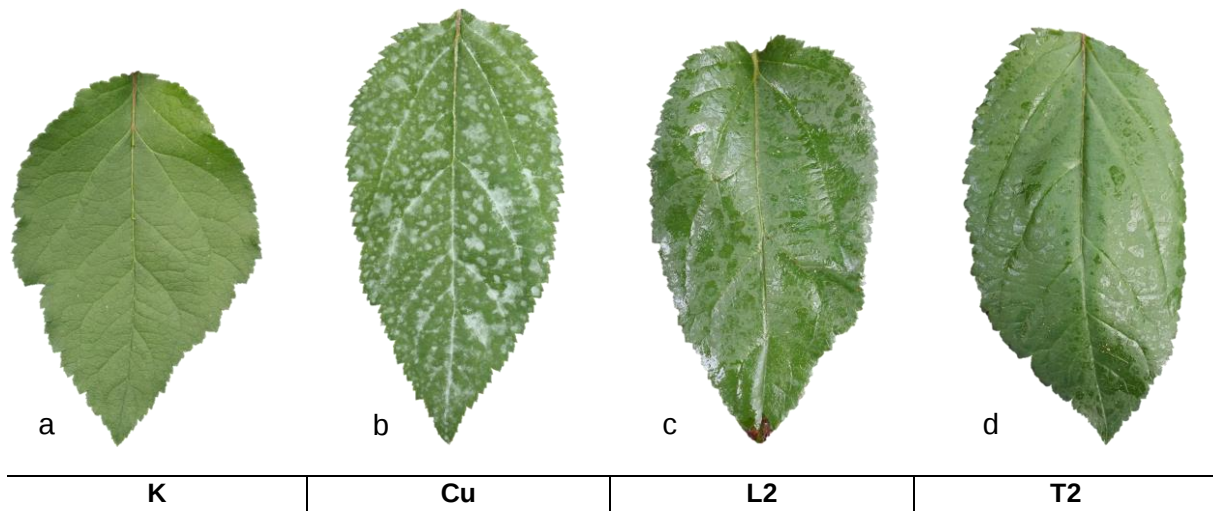


Abbildung 3: Abgetrockneter Spritzbelag der Pflanzenöle im Vergleich zum eingesetzten Fungizid und zur unbehandelten Kontrolle auf der Blattoberfläche von Apfelsämlingen aus der Versuchsreihe der Mehrfachbehandlung; dokumentiert im Anschluss an die vierte Behandlung (21 TneB); T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentration = 2%), Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), K = unbehandelte Kontrolle.

3.2.2 Vegetationsindices nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen

Für die Ergebnisse der Mehrfachbehandlung der Apfelsämlinge wurden nur die homogenen Untergruppen der durchgeführten Varianzanalyse des Post-hoc-Tests des letzten Messtermins den Abbildungen hinzugefügt. Diese Darstellung wurde gewählt, um besonders den signifikanten Unterschied zwischen den Varianten am Ende des gesamten Messzeitraums, nach vier Ölbehandlungen, aufzuzeigen. Die weiteren homogenen Untergruppen der anderen Messtermine, sind im Anhang (Tabelle 15–23) zur Vollständigkeit mit aufgeführt.

In den folgenden Abbildungen 4-22 steht die 1 in der jeweiligen Variantenbezeichnung (L1, T1, L1Cu, L1Cu) für eine Ölkonzentration von 1% und die 2 in der Variantenbezeichnung (L2, T2, L2Cu, L2Cu) für eine Ölkonzentration von 2%.

In Abbildung 4 sind die mit dem QST ermittelten und in Abbildung 5 die mit dem PP ermittelten NDVI-Werte nach einer Mehrfachbehandlung (vier Behandlungen im Rhythmus von sieben Tagen) der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) in zwei Konzentrationen (1 = 1%, 2 = 2%) einzeln und jeweils in Mischung mit einem Fungizid (Kupferpräparat = Cu) zum Vergleich zu kommerziellen Vergleichspräparaten (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der NDVI-Werte über einen Zeitraum von insgesamt 24 Tagen.

Insgesamt lagen die mit dem QST gemessenen NDVI-Werte (Abbildung 4) während des gesamten Messzeitraums von 24 Tagen zwischen 0,71 (Cu; 1 Tag nach erster Behandlung

(TneB) und 2 TneB)) und 0,86 (Mi; 24 TneB). Alle Varianten zeigten einen Anstieg des jeweiligen NDVI-Werts über die Zeit. Die niedrigsten NDVI-Werte zeigten sich an allen Messterminen bei der Fungizid-Variante (Cu). Alle anderen Varianten führten im direkten Vergleich zur Kontrolle zum Ende des Messzeitraums hin zu höheren NDVI-Werten. Am letzten Messtermin, drei Tage nach der vierten Behandlung, unterschieden sich die Öl-Varianten (L, T) in beiden Konzentrationen (1%, 2%) und Mi signifikant von den T+Cu-Varianten in beiden Konzentrationen (1%, 2%), von Cu und der Kontrolle. Höhere Konzentrationen der reinen Öle (L2, T2) führten im direkten Vergleich zu den niedrigeren Konzentrationen (L1, T1) zu höheren NDVI-Werten.

Insgesamt lagen die mit dem PP gemessenen NDVI-Werte (Abbildung 5) im gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 0,63 (Cu; 8 TneB) und 0,72 (L2; 24 TneB). Die NDVI-Werte der reinen Fungizid-Variante (Cu) waren an allen Messterminen am niedrigsten. Im direkten Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (K) führten nach 24 Tagen die reinen Öl-Varianten, L2Cu und Mi zu höheren NDVI-Werten. Einen signifikanten Unterschied gab es hierbei nicht. Am letzten Messtermin unterschied sich signifikant von der Kontrolle nur Cu.

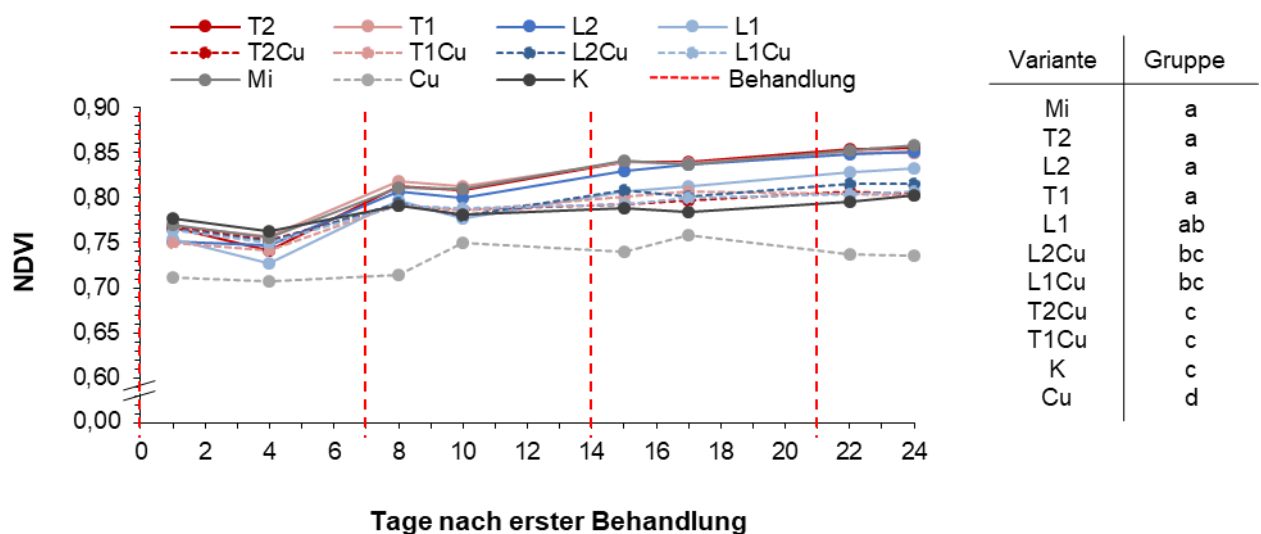


Abbildung 4: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex NDVI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 15 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang).

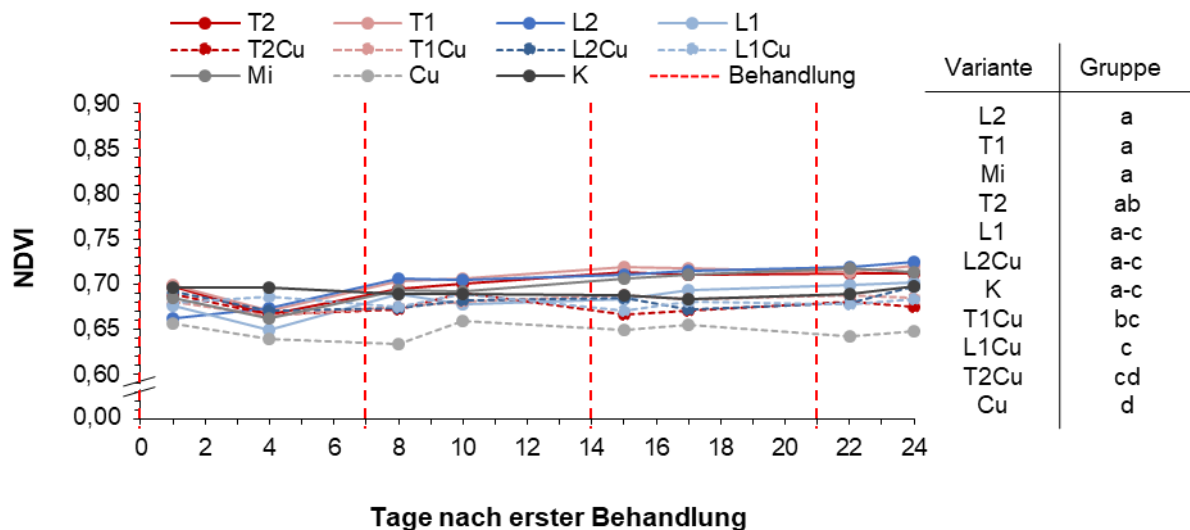


Abbildung 5: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex NDVI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **PolyPen RP 400 (UVIS) (PP)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 16 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang).

In Abbildung 6 sind die mit dem QST ermittelten und in Abbildung 7 die mit dem PP ermittelten G-Werte nach einer Mehrfachbehandlung (vier Behandlungen im Rhythmus von sieben Tagen) der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) in zwei Konzentrationen (1 = 1%, 2 = 2%) alleine und jeweils in Mischung mit einem Fungizid (Kupferpräparat = Cu) zum Vergleich zu kommerziellen Vergleichspräparaten alleine (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der G-Werte über einen Zeitraum von insgesamt 24 Tagen.

Insgesamt lagen die mit dem QST gemessenen G-Werte (Abbildung 6) über den gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 4,1 (Mi; 1 TneB) und 1,98 (Cu; 24 TneB). Alle Varianten zeigten einen Abfall des jeweiligen G-Werts über die Zeit. Bis auf Cu führten alle anderen Varianten im direkten Vergleich zur Kontrolle am letzten Messtermin zu höheren G-Werten. Am letzten Messtermin, drei Tage nach der vierten Behandlung, unterschieden sich beide Konzentrationen des Leinöls (L1, L2), Mi und die 2Cu-Varianten beider trocknender Öle (L, T) mit höheren G-Werten signifikant von der Kontrolle und Cu.

Insgesamt lagen die mit dem PP gemessenen G-Werte (Abbildung 7) im gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 2,77 (Mi; 1 TneB) und 1,63 (T2; 24 TneB). Nach der zweiten Behandlung sanken alle G-Werte ab und pendelten sich für alle Varianten zwischen 2,16 (L1; 8 TneB) und 1,63 (T2; 24 TneB) ein. Am Ende des Messzeitraums unterschied sich keine Variante signifikant von der unbehandelten Kontrolle. Einen signifikanten Unterschied

gab es zu diesem Zeitpunkt nur von T2Cu und L1 zu den anderen T-Varianten (auch mit Cu) und Cu alleine.

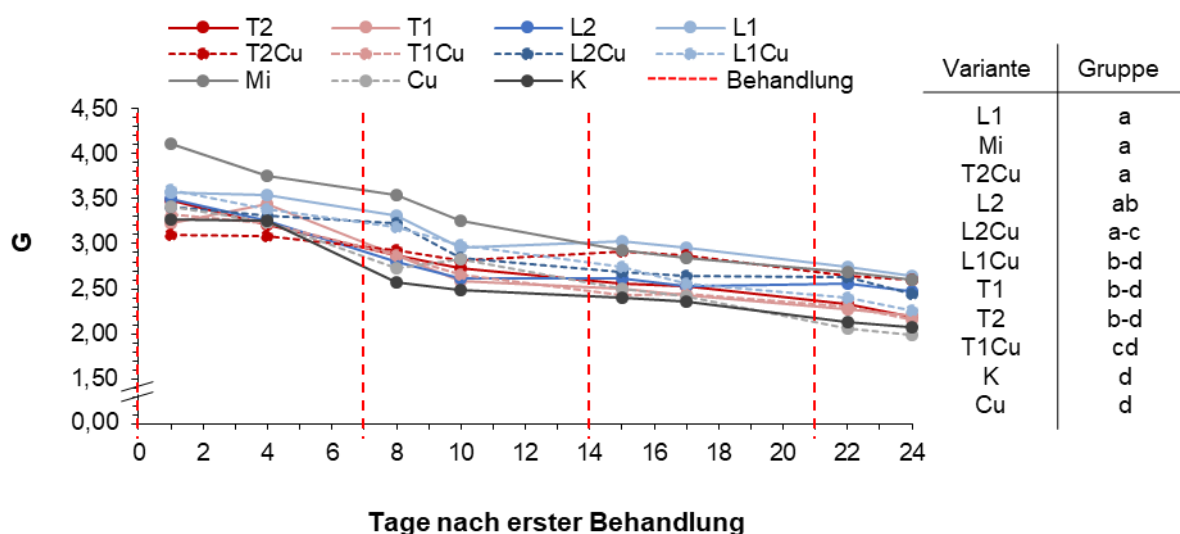


Abbildung 6: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex G von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 17 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang).

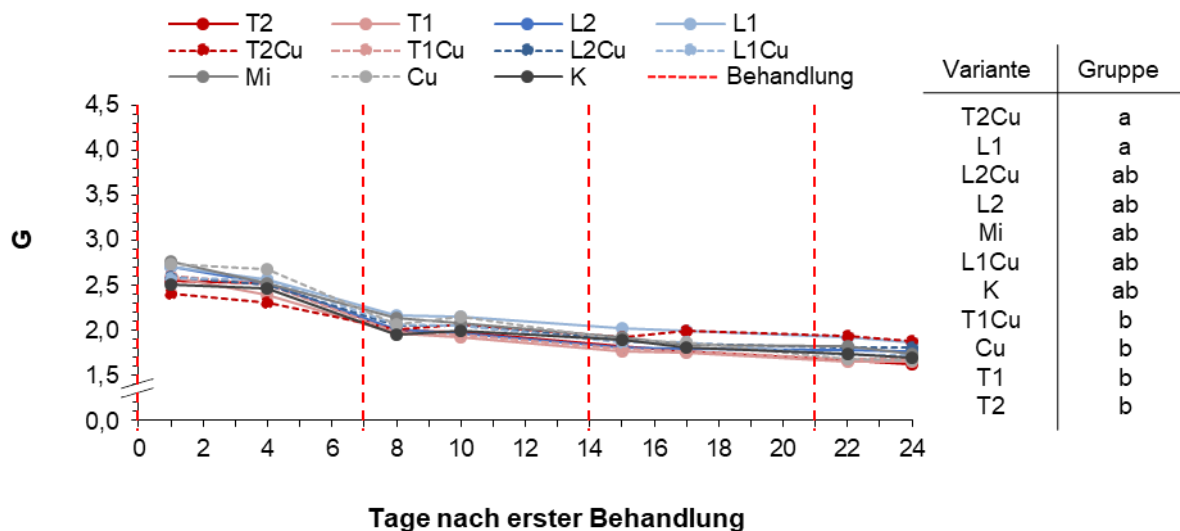


Abbildung 7: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex G von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **PolyPen RP 400 (UVIS) (PP)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 18 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang).

In Abbildung 8 sind die mit dem QST ermittelten und in Abbildung 9 die mit dem PP ermittelten PRI-Werte nach einer Mehrfachbehandlung (vier Behandlungen im Rhythmus von sieben Tagen) der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) in zwei Konzentrationen (1% = 1, 2% = 2) alleine und jeweils in Mischung mit einem Fungizid (Kupferpräparat = Cu) zum Vergleich zu kommerziellen Vergleichspräparaten alleine (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der PRI-Werte über einen Zeitraum von insgesamt 24 Tagen.

Insgesamt lagen die mit dem QST gemessenen PRI-Werte (Abbildung 8) über den gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 0,048 (L1; 4 TneB) und 0,086 (Mi; 24 TneB). Alle Varianten zeigten für sich gesehen einen Anstieg des jeweiligen PRI-Werts über die Zeit. Nach der zweiten Behandlung stiegen alle PRI-Werte an und lagen 8 TneB für alle Varianten, außer für Cu (0,048), zwischen 0,06 (L2Cu) und 0,072 (T2Cu). An Tag 10 fielen alle PRI-Werte leicht ab und ab Tag 15 stiegen alle Werte wieder leicht an, bis auf den PRI-Wert von Cu. Der PRI-Wert von Cu zeigte eine leicht gegenläufige Entwicklung in dieser Zeitspanne. Von Tag 22 bis 24 fiel der PRI-Wert der T1Cu Variante, dennoch führten bis auf Cu alle Varianten im direkten Vergleich zur Kontrolle am letzten Messtermin zu höheren PRI-Werten. Am letzten Messtermin, drei Tage nach der vierten Behandlung, führten Mi und alle reinen Öl-Varianten im direkten Vergleich zu den Öl-Varianten in Mischung mit dem Fungizid zu höheren PRI-Werten. Zudem unterschieden sich am letzten Tag alle Varianten, bis auf T1Cu, signifikant von der Kontrolle und von Cu.

Die mit dem PP gemessenen PRI-Werte (Abbildung 9) lagen im gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 0,052 (Cu; 22 TneB) und 0,071 (K; 4 TneB). Nach der zweiten Behandlung sanken alle PRI-Werte leicht ab und pendelten sich für alle Varianten zwischen 0,065 (Mi; 8 TneB) und 0,052 (Cu; 22 TneB) ein. Am Ende des Messzeitraums von 24 Tagen unterschieden sich nur die beiden reinen Leinöl-Varianten (L1, L2) signifikant von der unbehandelten Kontrolle und Cu.

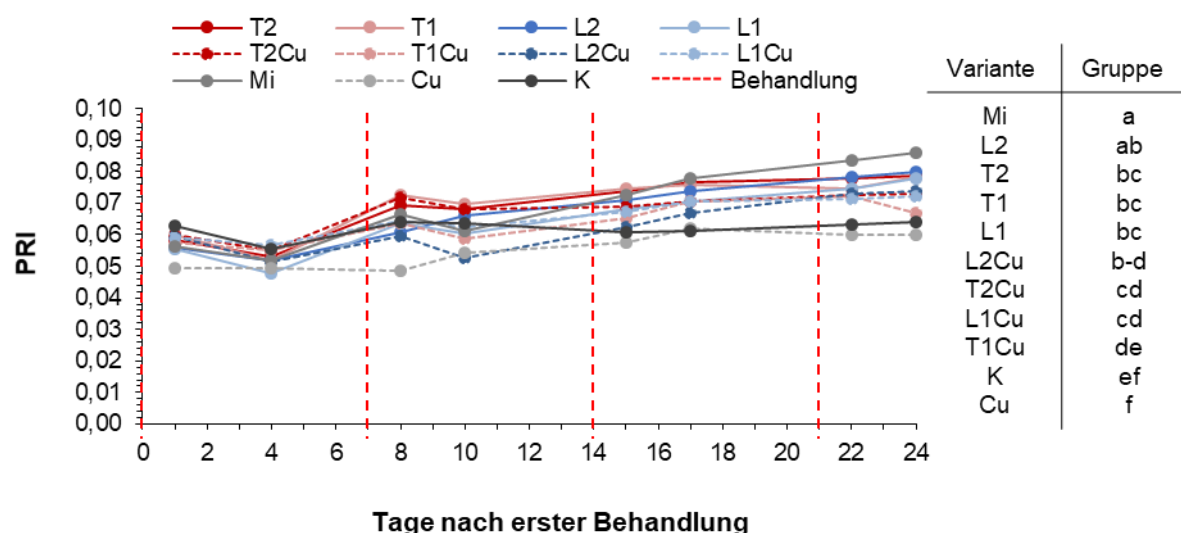


Abbildung 8: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex PRI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 19 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang).

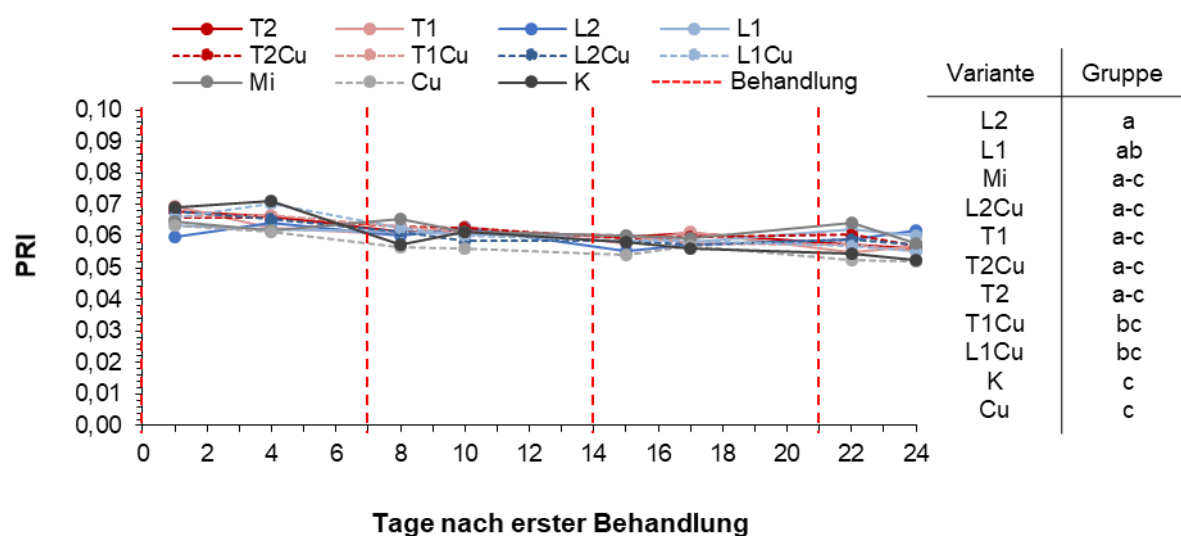


Abbildung 9: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex PRI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **PolyPen RP 400 (UVIS) (PP)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 20 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang).

In Abbildung 10 sind die mit dem QST ermittelten und in Abbildung 11 die mit dem PP ermittelten ARI1-Werte nach einer Mehrfachbehandlung (vier Behandlungen im Rhythmus von

sieben Tagen) mit den zwei trocknenden Pflanzenölen (L, T) in zwei Konzentrationen (1% = 1, 2% = 2) alleine und jeweils in Mischung mit einem Fungizid (Kupferpräparat = Cu) im Vergleich zu kommerziellen Vergleichspräparaten alleine (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der ARI1-Werte über einen Zeitraum von insgesamt 24 Tagen.

Insgesamt lagen die mit dem QST gemessenen ARI1-Werte (Abbildung 10) über den gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen -0,43 (T1; 24 TneB) und -1,54 (T1Cu; 22 TneB). Bis zu Tag 10 lagen alle ARI1-Werte nur zwischen -0,49 (T2Cu, 10 TneB) und -0,99 (K; 4 TneB). Bis Tag 22 gab es keine signifikanten Unterschiede der reinen Öl-Varianten (L, T) in beiden Konzentrationen (1%, 2%) zur Kontrolle (s. Tabelle 21 im Anhang). Nur am letzten Messtermin, unterschieden sich L1 und Mi als einzige Öl-Varianten signifikant von der Kontrolle. Von Tag 10 an unterschied sich zudem T1Cu an jedem weiteren Messtermin signifikant von anderen Varianten und erzielte bis zum letzten Messtermin die geringsten ARI1-Werte. An Tag 22 lagen die ARI1-Werte der Varianten am weitesten auseinander, zwischen -0,43 (T1) und -1,54 (T1Cu). Am letzten Messtermin, drei Tage nach der vierten Behandlung, erzielten im direkten Vergleich zur Kontrolle nur die beiden reinen Tungöl-Varianten (T2, T1) höhere ARI1-Werte. Zudem lagen zu diesem Zeitpunkt die vier reinen Öl-Varianten und Mi im direkten Vergleich über den ARI1-Werten der Öl-Varianten in Mischung mit dem Fungizid und über Cu.

Die mit dem PP gemessenen ARI1-Werte (Abbildung 11) lagen im gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 0,23 (Cu; 24 TneB) und 0,95 (T1; 15 TneB). Im Vergleich von Tag 1 zu Tag 17 sind die ARI1-Werte jeder Variante angestiegen. Die Öl-Varianten in Mischung mit dem Fungizid und Cu alleine sanken ab Tag 17 wieder ab, wohingegen alle vier reinen Öl-Varianten sowie Mi und K im weiteren Verlauf kaum Veränderungen in den ARI1-Werten aufwiesen. Am letzten Messtermin, drei Tage nach der vierten Behandlung, erzielten im direkten Vergleich zur Kontrolle die reine Leinöl-Variante (L2), die beiden reinen Tungöl-Varianten (T1, T2) und Mi höhere ARI1-Werte. Zudem lagen zu diesem Zeitpunkt die vier reinen Öl-Varianten und Mi im direkten Vergleich über den ARI1-Werten der Öl-Varianten in Mischung mit dem Fungizid und über Cu. Signifikante Unterschiede gab es am letzten Messtermin zwischen der jeweiligen Öl-Variante und der jeweiligen Öl-Variante in Mischung mit dem Fungizid.

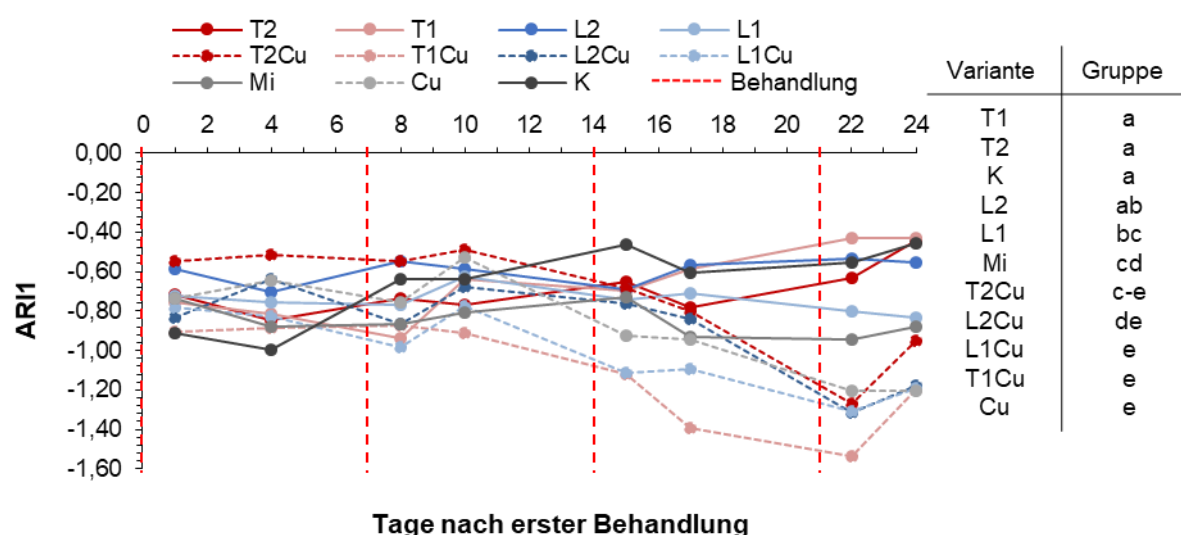


Abbildung 10: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex ARI1 von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 21 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang).

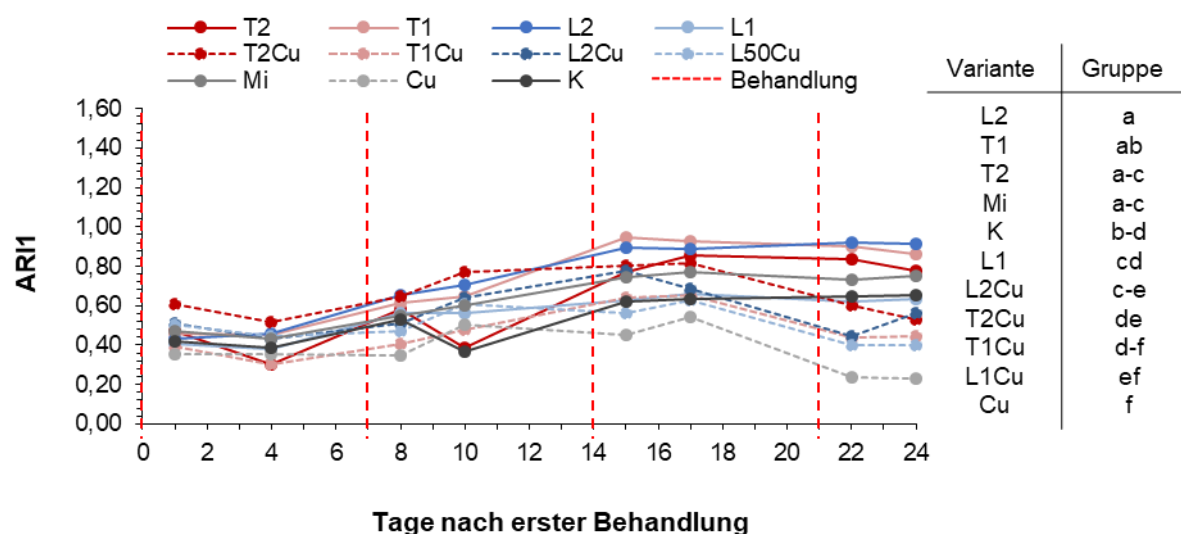


Abbildung 11: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex ARI1 von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **PolyPen RP 400 (UVIS) (PP)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 22 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 14 im Anhang).

In Abbildung 12 sind die mit dem QST ermittelten Werte des Wellenlängenverhältnisses 1600 nm / 820 nm (MSI) nach einer Mehrfachbehandlung (vier Behandlungen im Rhythmus

von sieben Tagen) der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) in zwei Konzentrationen (1%, 2%) alleine und jeweils in Mischung mit einem Fungizid (Kupferpräparat = Cu) zum Vergleich zu kommerziellen Vergleichspräparaten alleine (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung dieser Werte über einen Zeitraum von insgesamt 24 Tagen.

Insgesamt lagen die mit dem QST ermittelten MSI-Werte (Abbildung 12) über den gesamten Messzeitraum von 24 Tagen zwischen 0,67 (L2; 22 TneB) und 0,77 (Cu; 8 TneB). Bis Tag 8 stiegen alle Werte an und fielen bis Tag 17 wieder ab. Die ermittelten MSI-Werte der Öl-Fungizid-Mischungen sowie dem reinen Fungizid führten im Verlauf zu höheren Werten im direkten Vergleich zur Kontrolle. Die vier reinen Öl-Varianten und Mi lagen hingegen im direkten Vergleich darunter. Am letzten Messtermin, drei Tage nach der vierten Behandlung, unterschieden sich zudem alle Cu-Varianten signifikant von der Kontrolle.

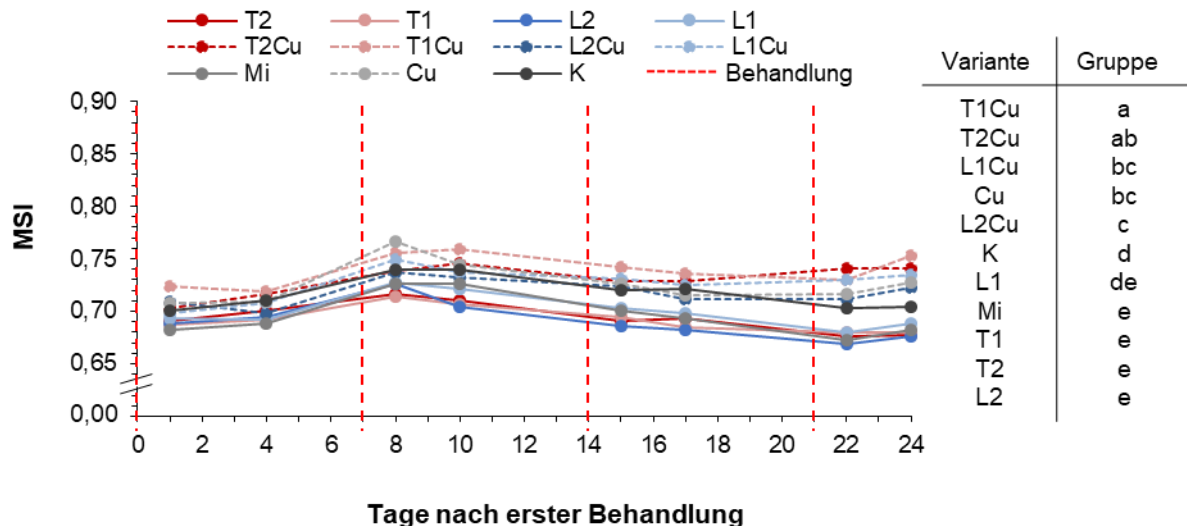


Abbildung 12: Einfluss einer vierfachen Ölbehandlung (wöchentlich) auf die Entwicklung des Vegetationsindex MSI von Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**, dargestellte homogene Untergruppen basieren auf Daten des letzten Messtermins (weitere hUg in Tabelle 23 im Anhang); ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede; (n in Tabelle 13 im Anhang).

3.2.3 Vegetationsindices nach Einfachbehandlung in Kombination mit biotischem Stress von Apfelsämlingen

In Abbildung 13 ist der aus den Bonituren des ersichtlichen Schadbildes berechnete Schadensindex (SI) der zwei jüngsten Blättetagen von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder nach einmaliger Behandlung dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung des SI über einen Zeitraum von 31 Tagen nach Behandlung mit den zwei trocknenden Pflanzenölen (L, T) in zwei Konzentrationen (1% = 1, 2% = 2) alleine und jeweils in Mischung mit einem Fungizid

(Kupferpräparat = Cu) im Vergleich zu kommerziellen Vergleichspräparaten alleine (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K). Insgesamt lagen die SI-Werte über den gesamten Versuchszeitraum von 31 Tagen zwischen 0,00 (L2Cu: alle Messpunkte; L2, L1, T2Cu, T1Cu, L2Cu, L1Cu, Mi und Cu: 14 TnB) und 36,46 (K: 31 TnB). Alle Varianten, bis auf L2Cu und L1Cu, zeigten einen Anstieg des jeweiligen SI-Werts über die Zeit. Die Pflanzen der L2Cu Variante wiesen zudem über den gesamten Versuchszeitraum kein ersichtliches Schadbild auf. Trotz sichtbarer Unterschiede zeigten sich zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede im SI zwischen den Varianten. Die Pflanzen der beiden reinen Tungöl-Varianten (T1 & T2) sowie die der Kontroll-Variante (K) zeigten 14 TnB die ersten Schadbilder. Die SI-Werte der Kontrolle (K) waren an allen Boniturterminen, bis auf 17 TnB, am höchsten. Zwischen den letzten beiden Boniturterminen zeigte die Fungizid-Variante (Cu) im Vergleich zu den anderen Varianten einen erhöhten Anstieg des SI-Werts.

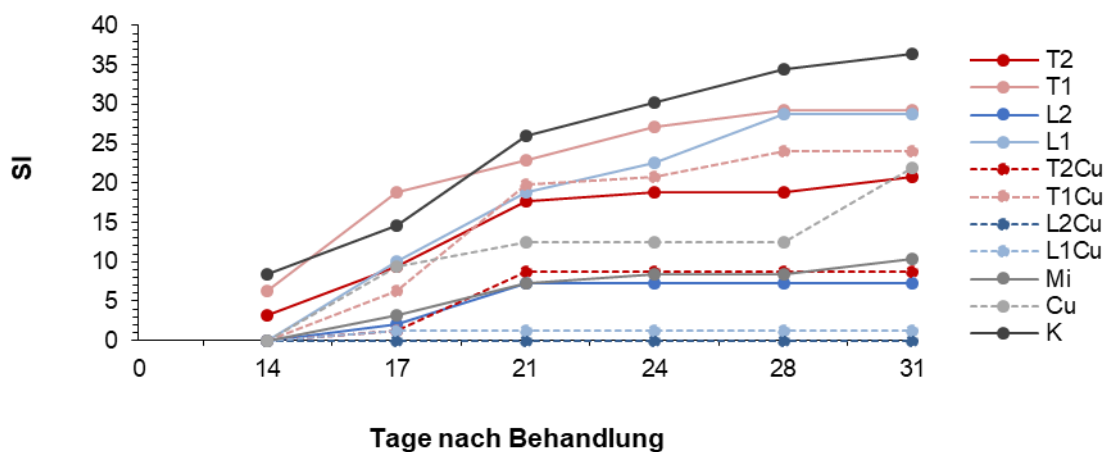


Abbildung 13: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf den aus den Bonituren des ersichtlichen Schadbildes berechneten SI von den zwei jüngsten Blättern von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; (T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); (n in Tabelle 24 im Anhang). hUg aller Messtermine: **n.s.** = nicht signifikant.

Um den Einfluss der Ölbehandlungen auf das Schadbild zu beurteilen wurden zusätzlich zu den Bonituren regelmäßige Spektralmessungen mit dem QST durchgeführt. In den folgenden Abbildungen 14 bis 22 sind die mit dem QST ermittelten Vegetationsindizes (NDVI, G, PRI, ARI1, Lic2, Ctr2, R1480/R2135, R1500/R2250, MSI) der inokulierten Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder nach einmaliger Ölbehandlung dargestellt. Abgebildet ist jeweils die Entwicklung eines Vegetationsindexes über einen Zeitraum von 31 Tagen nach Behandlung mit den zwei trocknenden Pflanzenölen (L, T) in zwei Konzentrationen (1 = 1%, 2 = 2%) alleine und jeweils in Mischung mit einem Fungizid (Kupferpräparat = Cu) im Vergleich

zu kommerziellen Vergleichspräparaten alleine (Cu, Mi) und einer unbehandelten Kontrolle (K).

In Abbildung 14 sind die mit dem QST ermittelten NDVI-Werte dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der NDVI-Werte über einen Zeitraum von 31 Tagen nach Behandlung. Insgesamt lagen die mit dem QST gemessenen NDVI-Werte über den gesamten Messzeitraum zwischen 0,74 (Cu; 10 TnB) und 0,8 (L2; 24 TnB). Von Tag 17 nach Behandlung an zeigte die L1-Variante im direkten Vergleich jeweils die niedrigsten NDVI-Werte und die L2-Variante mit die höchsten Werte. Über den gesamten Untersuchungszeitraum gab es keine signifikanten Unterschiede der Öl-Varianten zur Kontrolle und alle Varianten zeigten einen konstanten Verlauf des jeweiligen NDVI-Werts über die Zeit.

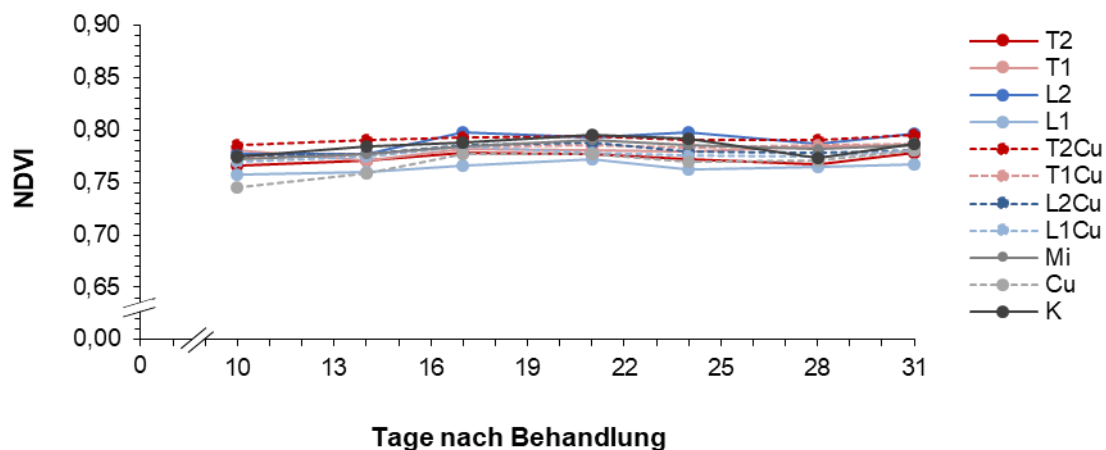


Abbildung 14: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex NDVI inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**; (hUg in Tabelle 25 und n in Tabelle 24 im Anhang).

Abbildung 15 zeigt die mit dem QST ermittelten G-Werte (554 nm / 677 nm) der inokulierten Blätter nach einmaliger Behandlung. Insgesamt lagen die gemessenen G-Werte über den gesamten Messzeitraum von 31 Tagen zwischen 1,79 (L1Cu; 21 TnB) und 2,63 (T1Cu; 10 TnB). Signifikante Unterschiede gab es nur an Tag 28 nach Behandlung zwischen den Varianten L1Cu und T2Cu sowie an Tag 31 nach Behandlung zwischen L1Cu und der Kontrolle. Insgesamt sanken die G-Werte aller Varianten bis Tag 21 nach Behandlung ab und stiegen im Anschluss bis Tag 31 nach Behandlung wieder an. Dies traf auf alle Varianten zu bis auf die Varianten T2Cu, T1Cu und L2Cu. Deren G-Werte stiegen nur bis Tag 28 an und sanken zum letzten Messtermin hin wieder leicht ab. Am letzten Messtermin (31 TnB) lagen im direkten Vergleich die G-Werte aller Varianten unter dem G-Wert der Kontrolle.

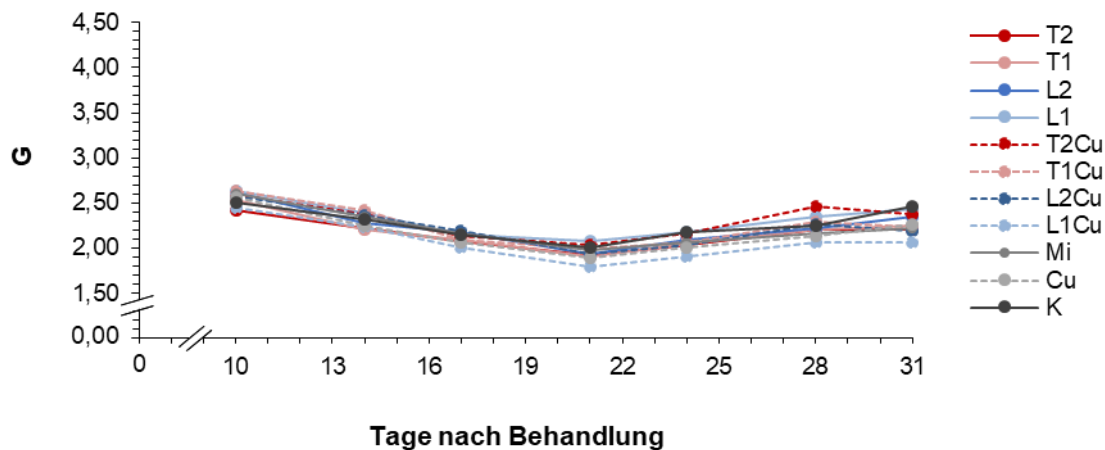


Abbildung 15: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex G inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**; (hUg in Tabelle 26 und n in Tabelle 24 im Anhang).

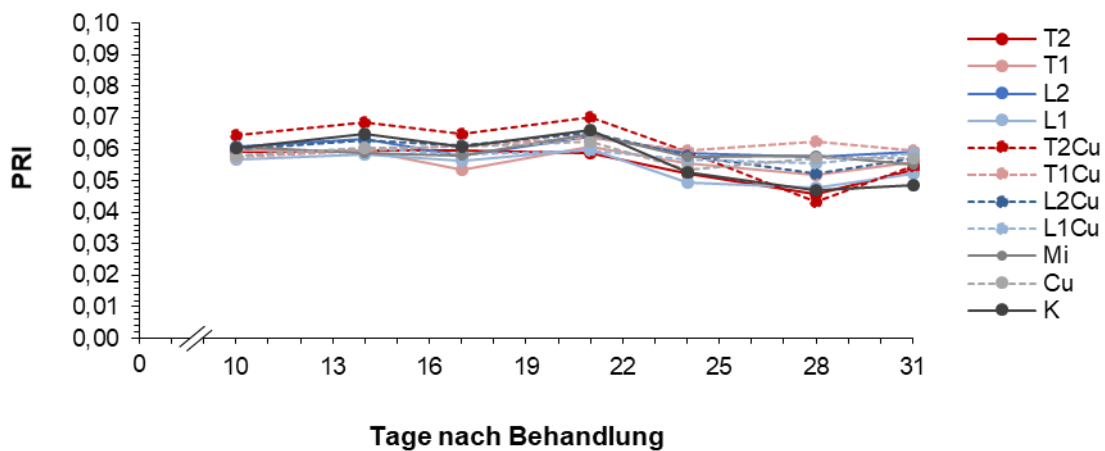


Abbildung 16: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex PRI inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**; (hUg in Tabelle 27 und n in Tabelle 24 im Anhang).

In Abbildung 16 sind die mit dem QST ermittelten PRI-Werte dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung dieser Werte über einen Messzeitraum von 31 Tagen. Insgesamt lagen die gemessenen PRI-Werte über den gesamten Messzeitraum zwischen 0,04 (T2Cu; 28 TnB) und 0,07 (T2Cu; 21 TnB). An Tag 14, 17, 21 und 28 nach Behandlung wurden jeweils signifikante Unterschiede zwischen Öl- und Öl-Fungizid-Varianten gemessen. An allen vier Terminen unterschied sich mindestens eine Öl-Variante oder eine Öl-Fungizid-Variante signifikant von

der Variante T2Cu. Bis Tag 21 nach Behandlung erzielte T2Cu im direkten Vergleich die höchsten PRI-Werte und an Tag 28 nach Behandlung den niedrigsten Wert. T1Cu erzielte an Tag 28 nach Behandlung hingegen den höchsten PRI-Wert. Im Schnitt stiegen die PRI-Werte bis Tag 21 nach Behandlung an, sanken bis Tag 24 bzw. 28 nach Behandlung und stiegen anschließend wieder leicht an. 31 TnB lagen im direkten Vergleich die PRI-Werte aller Varianten über dem PRI-Wert der Kontrolle.

In Abbildung 17 sind die mit dem QST ermittelten ARI1-Werte dargestellt. Abgebildet ist auch hier die Entwicklung der Werte über einen Zeitraum von 31 Tagen nach Behandlung. Insgesamt lagen diese über den gesamten Messzeitraum zwischen -0,20 (T2; 21 TnB) und -1,02 (T2Cu; 28 TnB). Im Verlauf von Tag 14 bis Tag 21 nach Behandlung sind die ARI1-Werte von jeder Variante angestiegen. Im weiteren Verlauf bis Tag 28 nach Behandlung sanken alle ARI1-Werte im direkten Vergleich wieder ab. Signifikante Unterschiede zeigten sich an Tag 14, 28 und 31 nach Behandlung. Dabei führte 14 TnB die Variante L1 zu signifikant höheren ARI1-Werten als die Fungizid-Variante Cu. Zusätzlich führten L1 und T2 zu signifikant höheren ARI1-Werten als T2Cu (28 TnB) und K (31 TnB). Am letzten Messtermin war dementsprechend der ARI1-Wert der Kontrolle niedriger als die ARI1-Werte aller anderen Varianten.

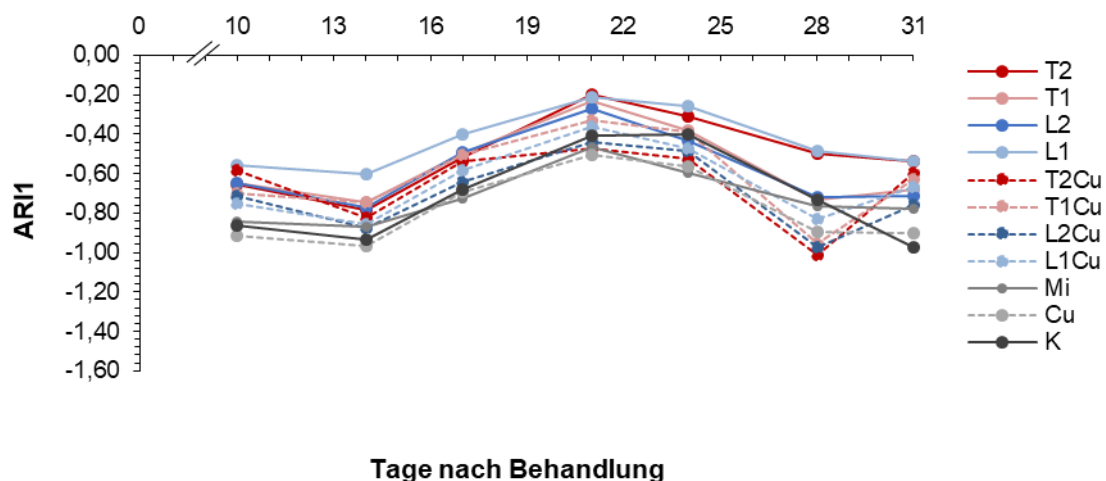


Abbildung 17: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex ARI1 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**; (hUg in Tabelle 28 und n in Tabelle 24 im Anhang).

Abbildung 18 zeigt die mit dem QST ermittelten Lic2-Werte (440 nm / 690 nm) von inokulierten Blättern nach einmaliger Behandlung. Insgesamt lagen diese gemessenen Werte den gesamten Messzeitraum über zwischen 0,87 (L1; 10 TnB) und 1,13 (T2Cu; 28 TnB). Im

direkten Vergleich verliefen die Werte der Variante L1 von Tag 10 bis Tag 21 nach Behandlung unterhalb von den Werten der anderen Varianten. Im Gegensatz dazu lagen die Werte der Kontrolle von Tag 10 bis Tag 17 oberhalb aller anderen Werte. An Tag 28 nach Behandlung zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen T2Cu und allen anderen Varianten, bis auf die anderen drei Öl-Fungizid-Varianten. Am letzten Messtermin lagen im direkten Vergleich die Werte aller Varianten unter dem Wert der Kontrolle.

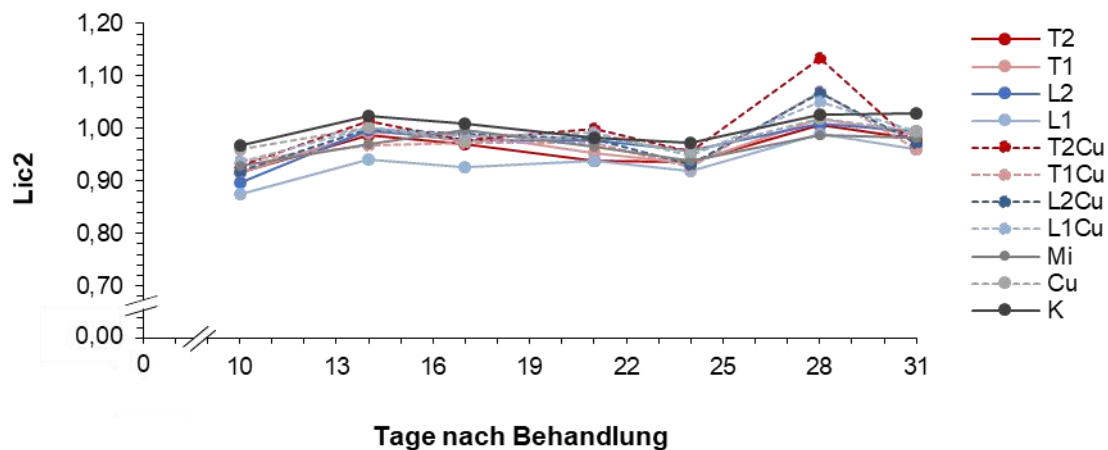


Abbildung 18: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex Lic2 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 29 und n in Tabelle 24 im Anhang).

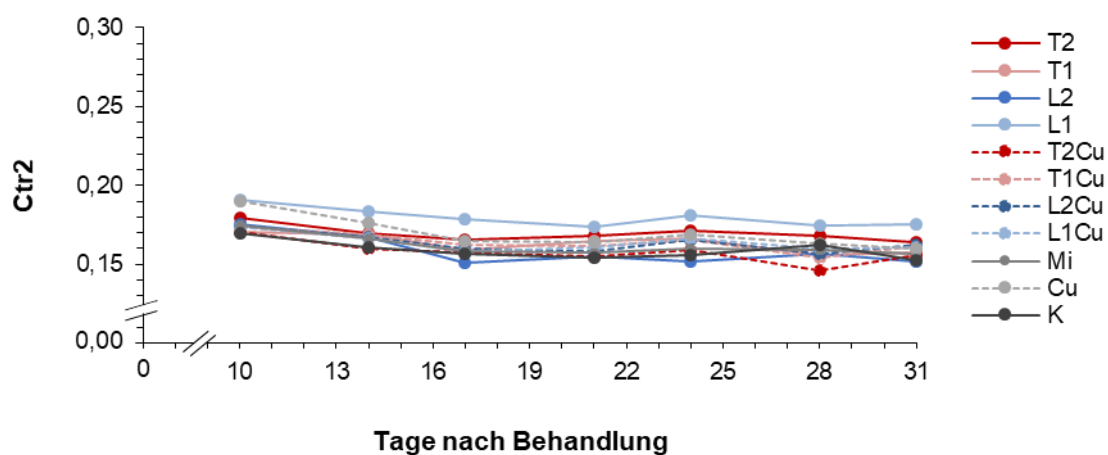


Abbildung 19: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex Ctr2 inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 30 und n in Tabelle 24 im Anhang).

In Abbildung 19 sind die Ctr2-Werte (695 nm / 760 nm) dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der Werte über einen Zeitraum von 31 Tagen nach Behandlung. Insgesamt lagen diese über den gesamten Messzeitraum zwischen 0,15 (T2Cu; 28 TnB) und 0,19 (L1; 10 TnB), wobei die Werte der Variante L1 an allen Messterminen oberhalb der anderen Werte lagen. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen L1 und L2 an Tag 17 und 24 sowie zwischen L1 und T2Cu an Tag 28 nach Behandlung. 31 TnB waren die Ctr2-Werte aller Varianten höher als der Wert der Kontrolle.

In Abbildung 20 sind die mit dem QST ermittelten Werte des Wellenlängenverhältnisses 1480 nm / 2135 nm dargestellt. Abgebildet ist die Entwicklung der Werte ebenfalls über einen Zeitraum von 31 Tagen nach Behandlung. Insgesamt lagen diese über den gesamten Messzeitraum zwischen 1,08 (L1Cu; 17 TnB) und 1,17 (L2; 31 TnB). Signifikante Unterschiede waren an Tag 14, 28 und 31 nach Behandlung zu verzeichnen. Dabei zeigten die Varianten Mi und T1Cu 14 TnB geringere Werte als die Variante L2Cu. 28 TnB hingegen führte die Behandlungsvariante L1Cu zu signifikant geringeren Werten als T2Cu, L2 und Cu. Am Ende der Versuchsreihe, 31 Tage nach Behandlung, zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen T1Cu und L2. Im Schnitt stiegen die Werte von Tag 10 bis Tag 14 nach Behandlung an, sanken bis Tag 17 nach Behandlung ab und stiegen anschließend von Tag 21 bis zum Ende des Messzeitraums wieder an. 31 TnB lag im direkten Vergleich der Varianten eine Hälfte der Werte über dem Wert der Kontrolle und die andere Hälfte unter dem Wert der Kontrolle.

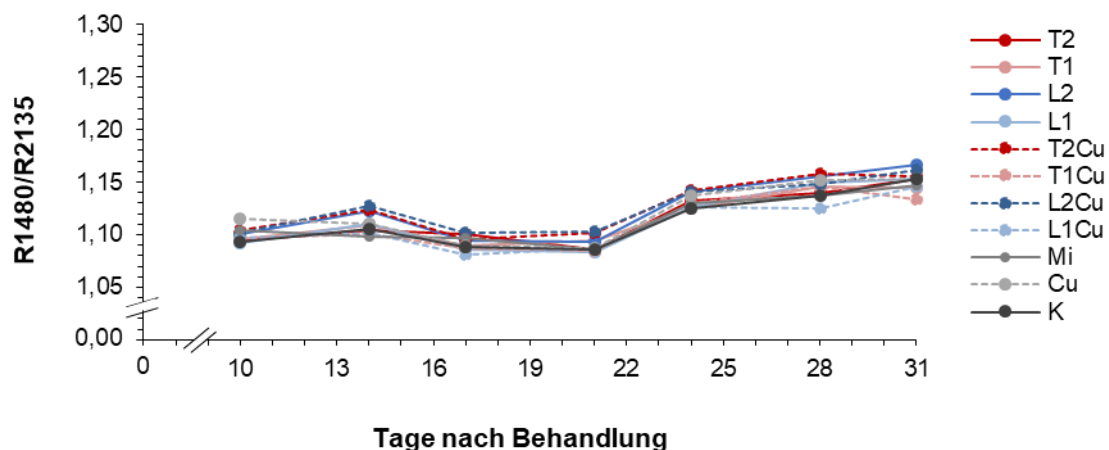


Abbildung 20: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex R_{1480}/R_{2135} inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: QualitySpec Trek (QST); (hUg in Tabelle 31 und n in Tabelle 24 im Anhang).

Abbildung 21 zeigt die mit dem QST ermittelten Werte des Wellenlängenverhältnisses 1500 nm / 2250 nm der inokulierten Blätter nach einmaliger Behandlung. Insgesamt lagen diese gemessenen Werte den gesamten Messzeitraum über zwischen 1,15 (L1; 10 TnB) und 1,21 (T2Cu; 28 TnB). Signifikante Unterschiede zeigten sich an Tag 10, 14, 24 und 28 nach Behandlung. Von Tag 17 bis Tag 28 nach Behandlung waren die Werte der Kontrolle am geringsten. Dabei unterschied sich der Wert der Kontrolle an Tag 24 nach Behandlung signifikant vom Wert der Variante L2Cu und an Tag 28 nach Behandlung von den Werten der Varianten L2Cu, T2Cu und T1Cu. 31 TnB lag im direkten Vergleich der Varianten auch bei diesem Index eine Hälfte der Werte über dem Wert der Kontrolle und die andere Hälfte unter dem Wert der Kontrolle.

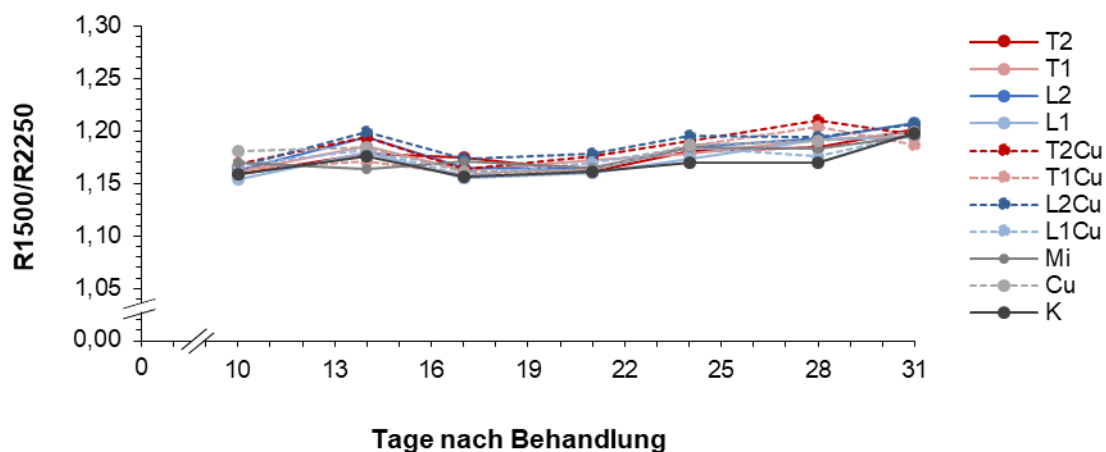


Abbildung 21: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex R_{1500}/R_{2250} inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**; (hUg in Tabelle 32 und n in Tabelle 24 im Anhang).

In Abbildung 22 sind die mit dem QST ermittelten MSI-Werte (1600 nm / 820 nm) dargestellt. Insgesamt lagen die gemessenen Werte über den gesamten Messzeitraum von 31 Tagen nach Behandlung zwischen 0,71 (Mi; 31 TnB) und 0,76 (K; 10 TnB). Signifikante Unterschiede waren bei der ersten Messung (10 TnB) und bei der letzten Messung (31 TnB) zu verzeichnen. An Tag 10 unterschied sich der Wert der Kontrolle signifikant vom Wert der Variante T1 und an Tag 31 von den Werten der Varianten Mi, L2, T1Cu, L2Cu und L1Cu. Am letzten Messtermin lagen somit die Werte aller Varianten unter dem Wert der Kontrolle. Alle Varianten zeigten über den gesamten Versuchszeitraum ein leichtes Absinken des Wellenlängenverhältnisses.

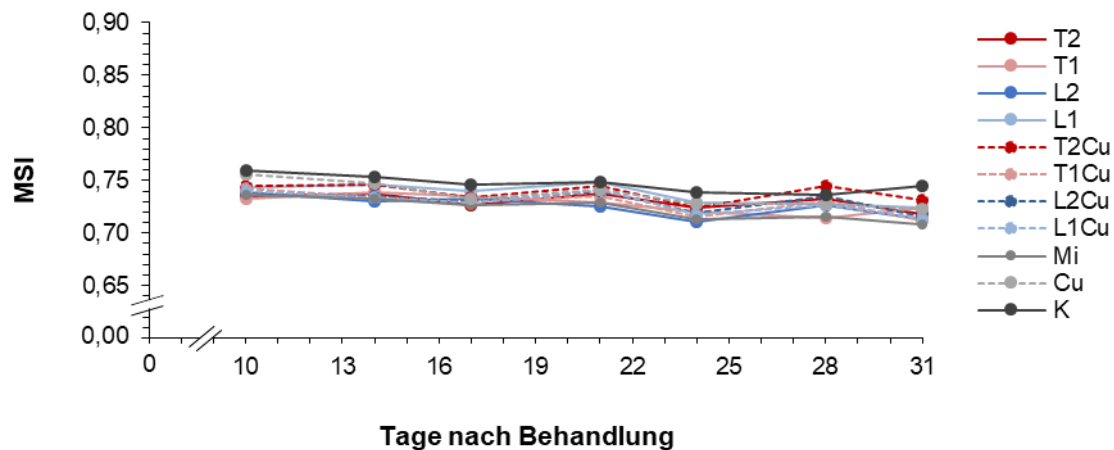


Abbildung 22: Einfluss einer einmaligen Ölbehandlung auf die Entwicklung des Vegetationsindex MSI inokulierter Blätter von Apfelsämlingen der Sorte Bittenfelder; T = Tungöl, L = Leinöl, (Konzentrationen: 1% = alle Varianten mit 1, 2% = alle Varianten mit 2), K = unbehandelte Kontrolle, Cu = Fungizid (Funguran = Kupfer), Mi = Rapsölpräparat (Micula); Messung mittels Spektrometer: **QualitySpec Trek (QST)**; (hUg in Tabelle 33 und n in Tabelle 24 im Anhang).

3.2.4 Reflexion nach Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress von Buschbohnen

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse zur Wirkung der verwendeten Pflanzenöle im Rahmen der Versuchsreihen zur Einfachbehandlung in Kombination mit abiotischem Stress, in Form von zusätzlichem UV-Licht, am Beispiel von Buschbohnen dargestellt. Verglichen wurde in dieser Versuchsreihe die Auswirkung des kommerziellen Produktes CutiSan® (Abbildung 23A), des Tungöls (Abbildung 23B), der beiden Präparate in Kombination (Abbildung 23C) und einer zusätzlich unbehandelten Kontrolle. Dargestellt sind die Reflexionsmuster der Varianten 13 Tage nach Behandlung im Bereich von 500-600 nm. Dabei wurde die eine Hälfte aller Varianten nach Behandlung einer zusätzlichen täglichen UV-Bestrahlung von 6 h ausgesetzt und die andere Hälfte lediglich unter kontrollierten Gewächshausbedingungen weiter kultiviert.

In Abbildung 23A sind die Reflexionsmuster der CutiSan-Behandlungen im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle mit zusätzlicher UV-Bestrahlung und ohne UV-Bestrahlung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Reflexionsmuster der mit CutiSan behandelten Pflanzen jeweils mit und ohne UV-Bestrahlung leicht über dem Reflexionsmuster der jeweiligen Kontrollvariante lag. In Abbildung 23B sind darüber hinaus die Reflexionsmuster der Tungöl-Behandlungen mit und ohne UV-Bestrahlung ebenfalls im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass das Reflexionsmuster der Tungöl-Variante unter zusätzlicher UV-Bestrahlung deutlich über dem Reflexionsmuster der Kontrolle (+UV) verlief. Ergänzend dazu sind in Abbildung 23C die Reflexionsmuster der Tungöl-CutiSan-Varianten mit und ohne UV-

Bestrahlung im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle abgebildet. Hinsichtlich der Kombination aus Tungöl und CutiSan (Abbildung 23B) konnte besonders bei der Variante nach zusätzlicher UV-Bestrahlung festgestellt werden, dass das Reflexionsmuster im Vergleich zur reinen Tungöl-Variante (Abbildung 23B) einen niedrigeren Verlauf aufzeigte.

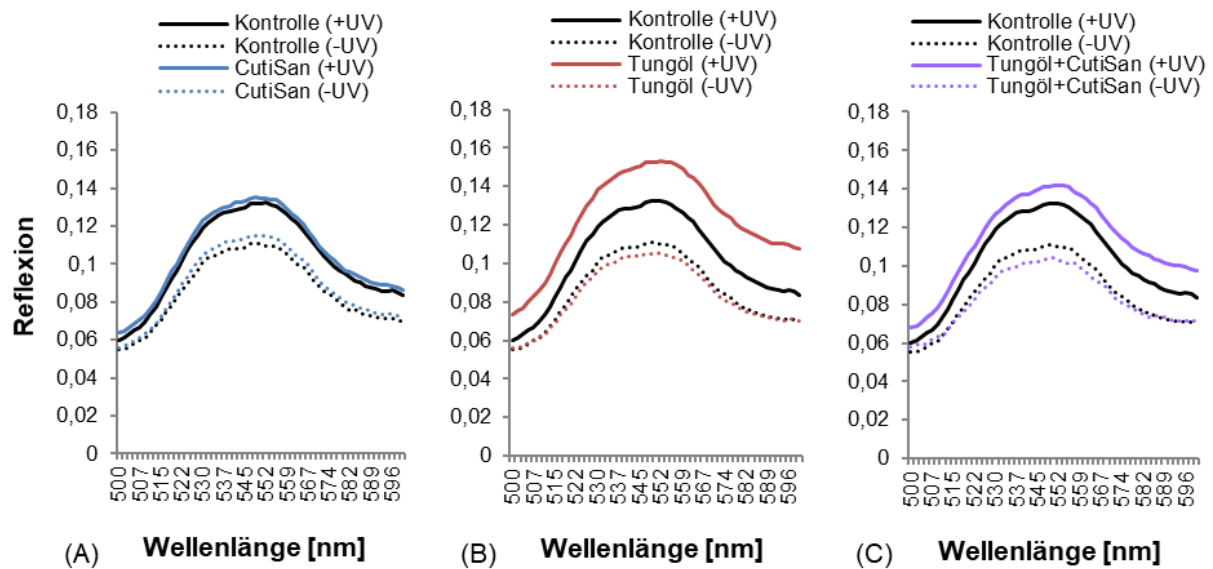


Abbildung 23: Vergleich des Reflexionsmusters (500-600 nm) von Buschbohnen nach täglicher UV-Bestrahlung von 6 h (+UV) und ohne UV-Bestrahlung (-UV), dargestellt 13 Tage nach Behandlung mit (A) CutiSan, (B) Tungöl und (C) Tungöl+CutisSan, Öl-Konzentration von 2%, n = 5.

4 Diskussion

Glyceridische Pflanzenöle können phytotoxische Wirkungen auf Pflanzen und demzufolge einen Einfluss auf den physiologischen Zustand von Pflanzen haben (vgl. Kapitel A 1.3). Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse von Pflanzenölen und ihrer Wirkung auf den Zustand von Pflanzen und der bekannten Wirkung bezüglich ihrer Phytotoxizität, ist ein Ziel dieser Arbeit, die Wirkung unterschiedlicher Konzentrationen der eingesetzten Pflanzenöle zu untersuchen und darüber hinaus zu zeigen, wie die Öle unter zusätzlichem biotischen und abiotischen Stress wirken. Ein weiteres Ziel ist es, aufzuzeigen, dass die physiologische Wirkung der Öle mit Hilfe von Sensoren gemessen werden kann und sich in VI und Reflexionsmustern widerspiegelt.

In den hier dargestellten Versuchsreihen (Abbildung 1 & Tabelle 8) konnte gezeigt werden, dass nach einer Leinöl- und Rapsölbehandlung, ab einer Ölkonzentration von 2%, leichte Blattschäden an Buschbohnen zu verzeichnen waren. Ab einer Konzentration von 5% traten sogar Blattschäden von mehr als 8% beim halbtrocknenden Rapsöl und von 14% beim trocknenden Leinöl auf (Abbildung 1). Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen hinsichtlich Toxizität von Ölen im Rahmen früherer Untersuchungen. So stellte Havis bereits 1950 die Annahme, dass ungesättigte Verbindungen für eine toxische Wirkung verantwortlich seien. Auch Baker (1970) fasste zusammen, dass für die Toxizität von Ölen u.a. der Anteil ungesättigter Verbindungen eine Rolle spielt und schlussfolgerte, dass insektizide und fungizide Sprühöle, mit einem hohen Anteil gesättigter Verbindungen, ein geringeres toxisches Risiko für Pflanzen darstellen. Darüber hinaus stellten Cohen et al. (1991) fest, dass, im Vergleich zu mehrfach ungesättigten Fettsäuren, die einfach ungesättigte Ölsäure eine geringere phytotoxische Wirkung aufwies. Auch in den hier dargestellten Versuchsreihen wies das Rapsöl eine geringere Phytotoxizität auf als das eingesetzte Leinöl. Die Fettsäurezusammensetzung des Leinöls setzt sich überwiegend aus der dreifach ungesättigten Linolensäure (bis zu 66%) und der einfach ungesättigten Ölsäure (bis zu 39%) zusammen. Demgegenüber enthält das halbtrocknende Rapsöl überwiegend die einfach ungesättigte Ölsäure (bis zu 67%) und bis zu 25% die zweifach ungesättigte Linolsäure (Firestone, 2013; Suresh et al., 2019). Diese Fettsäurezusammensetzungen und jeweiligen Anteile an einfach und mehrfach ungesättigten Fettsäuren in den beiden Ölen (Rapsöl und Leinöl), decken sich mit den Erkenntnissen aus der Literatur und den hier dargestellten Ergebnissen. Um möglichst geringe bis keine phytotoxischen Schäden an den Kulturen der Versuchsreihen zu verursachen, wurde folglich für die meisten Versuche dieser Arbeit eine Ölkonzentration von 1% bis 2% herangezogen. Im Umkehrschluss lässt sich vermuten, dass der Einsatz von hohen Ölkonzentrationen für herbizide Anwendungen geeignet scheint.

Es wurde die Hypothese formuliert, dass die physiologische Wirkung der Pflanzenöle mit Hilfe von Sensoren gemessen werden kann und sich in veränderten VI und Reflexionsmustern widerspiegelt. Im Rahmen von Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen wurden entsprechende Versuche zur Mehrfachbehandlung mit den Pflanzenölen an Apfelsämlingen durchgeführt. Durch Sensormessungen und anschließend ermittelte VI-Werte der Apfelsämlinge unter Mehrfachbehandlung kann der Einfluss der Öle näher betrachtet werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Öle gegebenenfalls als Stressor oder sogar als mögliches Stärkungsmittel in Bezug auf den Stressstatus bzw. die Pflanzengesundheit einzustufen. Die Mehrfachanwendung diente dabei ebenfalls der Einschätzung der möglichen Applikationsmenge und Konzentration hinsichtlich der Pflanzenverträglichkeit, ohne phytotoxische Schäden am pflanzlichen Gewebe hervorzurufen. Die wöchentlich durchgeführten Behandlungen kamen dabei einer Praxisanwendung von Pflanzenschutzmitteln am nächsten. Im Rahmen dieser Versuchsreihen wurden unterschiedliche VI zur genaueren Betrachtung herangezogen.

Gesundes Blattgewebe absorbiert zur Durchführung der Photosynthese und der Chlorophyllherstellung vorwiegend im blauen und roten Wellenlängenbereich (Hoffer & Johannsen, 1969; Smolyar, 2003) und reflektiert überwiegend im Nahinfrarotbereich (Hoffer & Johannsen, 1969; Peñuelas & Filella, 1998). Chlorophyll-Degradation kann dabei nicht nur bei der Blattalterung entstehen (Stamford et al., 2023), sondern auch eine Folge von biotischem (Lobato et al., 2010) und abiotischem Stress sein (Turan & Tripathy, 2015). Niedrige Werte des NDVI und des G zu Beginn und zur Mitte der Vegetationsphase können daher mit Stresseinwirkungen auf die Pflanze verbunden werden.

Der G zeigte bei den Apfelsämlingen nach mehrfacher Behandlung, anders als der NDVI, sinkende Werte über den Versuchszeitraum hinweg (NDVI = Abbildung 4 & 5; G = Abbildung 6 & 7). Der G-Wert nimmt üblicherweise über die Zeit ab, da es über die Zeit zu einer Chlorophyll-Degradation im Blatt kommt (Seneszenz) (Stamford et al., 2023). Mit einem Blick auf die Kontroll-Varianten beim NDVI (Abbildung 4 & 5) und G (Abbildung 6 & 7) lässt sich feststellen, dass im Vergleich dazu die Öl-Behandlungen und Kombinationen über die gesamte Versuchszeit meist höher waren. Zudem waren für beide Indices bei allen Varianten ähnliche Verläufe zu verzeichnen, und es waren kaum bis keine zusätzlichen Effekte durch die Öle festzustellen. Wie die Kontrolle stiegen auch die NDVI-Werte aller Varianten über die Zeit an und die G-Werte aller Varianten sanken stetig über den Versuchszeitraum ab. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es durch die mehrfachen Ölbehandlungen zu keinem veränderten Stressstatus der Apfelsämlinge gekommen ist. Beim NDVI lag lediglich die Cu-Variante zu jedem Messtermin unterhalb der NDVI-Werte der Kontrolle. Dies lässt sich möglicherweise mit dem leicht sichtbaren Spritzbelag dieser Variante erklären und kann auf ein dadurch verändertes Reflexionsverhalten dieser Variante zurückgeführt werden (vgl.

Abbildung 3). Zudem fällt auf, dass die mit den Ölen mehrfach behandelten Pflanzen im zeitlichen Verlauf höhere NDVI-Werte und teilweise höhere G-Werte aufzeigten, als die Pflanzen ohne Behandlung (Kontrolle). Diese höheren Werte der Öl-Varianten deuten auf höhere Chlorophyllgehalte und eine erhöhte Pflanzengesundheit hin. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse lässt sich ein Potenzial der trocknenden Pflanzenöle als Pflanzenschutzmittel oder als Pflanzenstärkungsmittel erkennen. Vor allem die eingesetzten und untersuchten Ölkonzentrationen (1% & 2%) erwiesen sich unter Verwendung der beiden Indices (NDVI & G) als pflanzenverträglich.

Bei einsetzendem Lichteinfluss ändert sich die Reflexion der Wellenlänge 531 nm durch die Umwandlung der Pigmente des Xanthophyll-Zyklus (Zeaxanthin-Antheraxanthin-Violaxanthin) (Gamon & Surfus, 1999; Peñuelas et al., 1995). Der PRI beschreibt die Aktivität der Pigmente des Xanthophyll-Zyklus (Gamon & Surfus, 1999) und kann als Indikator für die Bewertung der photosynthetischen Strahlungseffizienz (Garbulsky et al., 2011) herangezogen werden, sodass ein hoher PRI-Wert auf eine hohe photosynthetische Effizienz hinweist.

Die Cu-Variante zeigte zunächst geringere und nach einiger Zeit ähnliche PRI-Werte wie die Kontrolle (Abbildung 8 & 9). Eine Mehrfachbehandlung bewirkte vermutlich, durch den sichtbaren grün-gräulichen Spritzbelag des Fungurans, eine Verschiebung des Reflektionsspektrums. Denn beide Wellenlängen, die für die Berechnung des PRI herangezogen werden, befinden sich im grünen Bereich (531 nm & 570 nm). Es scheint als hätte das Fungizid (Cu) lediglich aufgrund seines grün-gräulichen Belags zu höheren PRI-Werten über die Zeit geführt. Es kann also vermutet werden, dass das Fungizid (Cu) ohne den Einfluss des sichtbaren Belags zu geringeren PRI-Werten geführt hätte und damit einhergehend eine geringere Effizienz der Photosynthese bewirkt worden wäre. Bereits Petit et al. (2012) schrieben dem Kupfer eine photosynthesehemmende Wirkung zu. Reine Öl-Varianten führten hingegen zu höheren PRI-Werten als die Kontrolle (Abbildung 8 & 9), wodurch den mit Ölen behandelten Pflanzen eine hohe photosynthetische Strahlungsausnutzung zugeschrieben werden kann. Die Öl-Fungizid-Varianten lagen vor allem am Ende der Versuchszeit unter den Werten der jeweiligen reinen Öl-Varianten. Dieser Effekt lässt sich durch die photosynthesehemmende Wirkung des Kupfers in den Öl-Fungizid-Varianten erklären. Auch durch die Betrachtung des PRI lässt sich feststellen, dass das trocknende Leinöl, das trocknende Tungöl und das halbtrocknende Rapsöl eine hohe Pflanzenverträglichkeit aufzeigten.

Anthocyanen wird die Eigenschaft zugeschrieben, die Photoinhibition unter Einfluss von Lichtstress zu verringern und sie können dazu beitragen, photooxidative Schäden zu reduzieren (Steyn et al., 2002). Je höher der gemessene Wert des ARI1, desto höher wird der Anthocyangehalt im Blatt geschätzt (Gitelson et al., 2004). Da Anthocyane bei vielen

Pflanzenarten als Indikator für Blattseneszenz und Stress dienen, kann der ARI1 demzufolge zur Einschätzung der Stresseinwirkung auf die Pflanze dienen.

Die reinen Öl-Varianten zeigten nach Mehrfachbehandlung und im Rahmen der QST-Daten keine Unterschiede zur Kontrolle. Lediglich zum letzten Messtermin hin, zeigten die Öl-Varianten (L1 & Mi) signifikant geringere Werte, sodass die Öle mit Blick auf die QST-Daten über die Zeit keine Stressreaktion bei den Pflanzen auslösten (Abbildung 10). Lein- und Rapsöl könnte folglich bei einer Mehrfachanwendung eine Reduktion von photooxidativen Schäden zugeschrieben werden. Die reine Fungizidvariante (Cu) sowie die Varianten Fungizid mit hoher Ölkonzentration (T2Cu & L2Cu) zeigten hingegen anfangs höher geschätzte Anthocyangehalte und damit einhergehend einen erhöhten Stressstatus (vgl. Tabelle 21 im Anhang). Diese Werte nahmen über die Zeit aber wieder ab. Mit Blick auf die PP-Daten der Mehrfachbehandlung lässt sich feststellen, dass bis Tag 17 im Schnitt die ARI-Werte aller Varianten anstiegen und ab Tag 17 die Öl-Mischungen und die Fungizid-Variante (Cu) wieder sanken (Abbildung 11). Demzufolge kann im Rahmen der PP-Messungen den meisten reinen Öl-Varianten eine leichte Stressreaktion der Pflanzen über die Zeit zugeschrieben werden.

Das Reflexionsspektrum von Blättern wird im Wellenlängenbereich zwischen 1300 nm und 2600 nm maßgeblich durch den Wassergehalt beeinflusst (Hoffer & Johannsen, 1969). Wassermoleküle absorbieren im besagten NIR-Bereich. Dementsprechend sinkt das Wellenlängenverhältnis 1600 nm/ 820 nm (MSI) der reflektierten Strahlung bei höheren Wassergehalten des Blattes.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung konnte festgestellt werden, dass über den Versuchszeitraum die Varianten der Fungizid-Mischungen und die Fungizid-Variante (Cu) höhere Werte im Vergleich zur Kontrolle aufzeigten, wohingegen die reinen Öl-Varianten und das kommerzielle Mi niedrigere Werte darlegten und unterhalb der Werte der Kontrolle lagen (Abbildung 12). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die mit den Ölen mehrfach behandelten Pflanzen höhere Wassergehalte aufwiesen, was möglicherweise mit einer Beeinflussung der Stomata der Pflanzen zusammenhängt. Vor allem die trocknenden Pflanzenöle besitzen durch ihre Fettsäurezusammensetzung filmbildende Eigenschaften (Roth & Kormann, 2000; Roth & Kormann, 2005; Yang et al., 2015), was gegebenenfalls einen Einfluss auf die Stomata und somit auf die Transpiration der Pflanzen hat. Folglich wiesen die Pflanzen der Öl-Varianten eine geringere Transpiration auf. Demgegenüber wiesen die Fungizid-Mischungen und die Fungizid-Variante (Cu) höhere MSI-Werte über die Zeit auf, was im Gegenzug auf niedrigere Wassergehalte im Blatt und somit auf eine höhere Transpiration der Blätter hindeutet.

Im Rahmen von Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen wurden entsprechende Versuche zur Einfachbehandlung mit den Pflanzenölen unter zusätzlichem

biotischen Stress an Apfelsämlingen durchgeführt. Durch Sensormessungen und anschließend ermittelte VI-Werte der Apfelsämlinge unter Einfachbehandlung mit zusätzlichem biotischen Stress in Form von *Venturia inaequalis* kann der Einfluss der Öle näher betrachtet werden. Zudem besteht die Möglichkeit, den Einfluss der Öle auf ein mögliches Schadbild nach Inokulation der Pflanzen einzustufen. Im Rahmen dieser Versuchsreihen wurden unterschiedliche VI zur genaueren Betrachtung herangezogen.

Der NDVI lässt, wie bereits erwähnt, Rückschlüsse über den Gesundheitsstatus (Stamford et al., 2023) bzw. Stressstatus einer Pflanze zu. Damit einhergehend sind auch Rückschlüsse über die Photosyntheseleistung von Pflanzen (Stamford et al., 2023) sowie über den allgemeinen Zustand von Pflanzen möglich, sodass der NDVI auch zur Schätzung des Chlorophyllgehalts einer Pflanze herangezogen werden kann (vgl. Kapitel A 1.4.1). Die NDVI-Werte aller Varianten verliefen über den gesamten Versuchszeitraum konstant und es waren keine signifikanten Unterschiede der Öl-Varianten zur Kontrolle zu verzeichnen. Lediglich bei Blättern, die mit Leinöl in geringer Konzentration (L1) einmalig behandelt wurden und einem zusätzlichen biotischen Stressfaktor (*Venturia inaequalis*) ausgesetzt waren, zeigten sich im direkten Vergleich zur L2-Variante, über den gesamten Messzeitraum, geringfügig niedrigere mit dem QST ermittelte NDVI-Werte (Abbildung 14). Mit diesen geringeren NDVI-Werten gehen geringer geschätzte Chlorophyllgehalte der L1-Variante einher. Bereits 1979 führten Spotts und Ferree (1979) auf, dass ein Befall mit *Venturia inaequalis* bei der Sorte Delicious 14 Tage nach der Infektion und bei der Sorte McIntosh 28 Tage nach der Infektion zu einer Reduktion der Photosynthese führten. Auch diese Ergebnisse lassen sich mit geringeren Chlorophyllgehalten erklären (Lobato et al., 2010). Die hier dargestellten Ergebnisse (Abbildung 14) lassen vermuten, dass die Variante L2 zu einer geringeren Schadentwicklung durch *Venturia inaequalis* und den zusätzlich entstandenen Nekrosen führte, als die Variante L1. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen der Bonituren des ersichtlichen Schadbildes (Abbildung 13). Denn auch im Rahmen der Ermittlung des SI lagen die Werte der L2-Variante unterhalb der Werte der L1-Variante, sodass für eine Anwendung die höhere Ölkonzentration effektiver zu sein scheint.

Wie in Kapitel A 1.4.1 bereits ausführlich dargestellt, beinhaltet der G-Index Absorptionseigenschaften des Chlorophylls (Peñuelas & Filella, 1998), wodurch er beispielsweise zur Erkennung von Stressfaktoren durch sich verändernde Chlorophyllgehalte (Yang et al., 2023) herangezogen werden kann. Insgesamt sanken die G-Werte aller Varianten im Schnitt bis Tag 21 nach Behandlung ab und stiegen im Anschluss bis Tag 31 nach Behandlung wieder leicht an (Abbildung 15). Üblicherweise nehmen die G-Werte über die Zeit ab, da es über die Zeit in den Blättern zu einer Chlorophyll-Degradation kommt (Seneszenz) (Stamford et al., 2023). Allerdings wiesen im Rahmen dieser Versuche alle Varianten, also auch die Kontrolle, diesen Verlauf der G-Werte über die Zeit auf, sodass gegebenenfalls ein

exogener Umwelteinfluss eine leichte Wirkung auf alle Varianten hatte. Bei den G-Werten dieser Versuche zur einmaligen Öl-Behandlung in Kombination mit einem zusätzlichen biotischen Stressfaktor (Abbildung 15) zeigten sich lediglich bei den QST-Daten an den letzten Messterminen jeweils einmalig signifikant geringere Werte bei der L1Cu-Variante im Vergleich zur Variante T2Cu (28 TnB) und im Vergleich zur Kontrolle (31 TnB). Auch diese Ergebnisse unterstützen die Ergebnisse der Bonitur des sichtbaren Schadbildes (Abbildung 13), hier wies die Variante L1Cu über die gesamte Versuchszeit einen der geringsten SI auf. Allerdings zeigten sich über den gesamten Messzeitraum sonst nur geringe Unterschiede in den G-Werten (Abbildung 15), sodass über die geschätzten Chlorophyllgehalte keine Rückschlüsse auf den Stressstatus durch die einmaligen Öl-Behandlungen in Kombination mit dem zusätzlichen biotischen Stressfaktor (*Venturia inaequalis*) gezogen werden können.

Der PRI beschreibt die Aktivität der Pigmente des Xanthophyll-Zyklus (Gamon & Surfus, 1999), wodurch er unter kontrollierten Bedingungen beispielsweise als Indikator für Wasserstress (Thenot et al., 2002) herangezogen werden kann (vgl. Kapitel A 1.4.1). Bei den PRI-Werten der Versuchsreihen zur Einmalbehandlung in Kombination mit zusätzlichem biotischen Stress (Abbildung 16) zeigten sich ab 14 TnB signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Varianten. Durch die Ergebnisse der nachfolgenden Messtermine kann somit ein Bezug zum SI hergestellt werden, denn ein erstes sichtbares Schadbild wurde 13 TnB beobachtet (Abbildung 13) und fiel somit mit dem Einsetzen signifikanter Unterschiede der PRI-Werte zusammen (Abbildung 16). Wie Feng et al. (2017) bereits feststellten, kann der PRI unter biotischem Stress auch als Grundlage für die Untersuchung von Schwankungen der Blattfeuchte genutzt werden, sodass eine Schätzung des durch den biotischen Stress verursachten Schaden möglich wird. In den hier dargestellten Ergebnissen in Abbildung 16 wurden an Tag 14, 17, 21 und 28 nach Behandlung jeweils signifikante Unterschiede zwischen Öl- und Öl-Fungizid-Varianten gemessen. Beispielsweise zeigte mindestens eine Öl-Variante oder eine Öl-Fungizid-Variante signifikant niedrigere PRI-Werte im Vergleich zur Variante T2Cu. Die Varianten, mit den niedrigen PRI-Werten und einem somit jeweils höheren Stressstatus, zeigten bei den durch die Bonitur des sichtbaren Schadbildes ermittelten SI zugleich hohe Werte (Abbildung 13). Die Variante T2Cu wies hingegen beispielsweise im Vergleich geringe SI-Werte auf. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Ergebnisse einer Bonitur des sichtbaren Schadbildes durch Darstellung des SI, durch Messung der PRI-Werte mittels QST ergänzt werden können. Folglich zeigte die Variante T2Cu ein geringes Schadbild und den geringsten Stressstatus nach Öl-Behandlung unter Einfluss von zusätzlichem biotischen Stress. Dieses Ergebnis kann zum einen der protektiven Wirkung des Fungizids (Cu) und zum anderen gegebenenfalls der möglichen zuvor festgestellten pflanzenstärkenden Wirkung des Tungöls zugeschrieben werden. Die reinen Tungöl-Varianten zeigten hingegen, trotz der möglichen pflanzenstärkenden Wirkung des Tungöls,

einen höheren Stressstatus und höheren SI. Dieses Ergebnis kann auf das Fehlen des Fungizids zurückgeführt werden.

Der ARI1 beschreibt den Anthocyangehalt von Blättern, wobei Anthocyane bei vielen Pflanzenarten beispielsweise als Indikatoren für Blattseneszenz und Stress dienen können, (Gitelson et al., 2001) (vgl. Kapitel A 1.4.1). Bei den hier dargestellten ARI1-Werten der QST-Daten (Abbildung 17) zeigten sich beim Auftreten eines ersten sichtbaren Schadbildes (14 TnB; vgl. Abbildung 13) sowie bei einer stärkeren Schadentwicklung (27 TnB und 31 TnB) durch *Venturia inaequalis* und den zusätzlich entstandenen Nekrosen bei der Variante L1 signifikante Unterschiede zu jeweils einer anderen Variante wie Cu (14 TnB), T2Cu (28 TnB) und der Kontrolle (31 TnB) (Abbildung 17). Die Anwendungen von Leinöl in geringer Konzentration (L1) und Tungöl in hoher Konzentration (T2) führten, den ARI1-Werten nach zu höheren Anthocyangehalten, was auf einen erhöhten Stressstatus dieser Pflanzen hindeutet. Die ARI1-Ergebnisse decken sich, bis auf die niedrigeren ARI1-Werte der Kontrolle, mit den Ergebnissen der Ermittlung des SI (Abbildung 13). Es ist demzufolge zu erkennen, dass die einmaligen Öl-Behandlungen in Kombination mit dem zusätzlichen biotischen Stressfaktor zu einem höheren Stressstatus in den Pflanzen führten als die Kontrolle, die lediglich dem biotischen Stress ausgesetzt gewesen war. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen von Gitelson et al. (2001), dass eine erhöhte Stresseinwirkung auf die Pflanze mit erhöhten Anthocyangehalten einhergeht. Dies spiegelt sich jedoch nicht direkt im sichtbaren Schadbild und den darüber ermittelten SI-Werten wider.

Der Lic2 bezieht sich auf den Chlorophyllgehalt (Delalieux et al., 2009a) und dient der Stresserkennung von Blättern (Main et al., 2011). Auch der Ctr2 dient als Index, um einen Hinweis auf Pflanzenstress zu geben (Carter, 1994). Delalieux et al. (2009a) zogen im Rahmen ihrer Untersuchungen beide VI (Lic2 & Ctr2), zur Ermittlung von biotischem Blattstress bei Apfelpflanzen unter Berücksichtigung der Blattphänologie, heran. Sie stellten fest, dass in einem weit entwickelten Infektionsstadium die VI (R440/R690) und (R695/R760) eine bessere Unterscheidung zwischen nicht infizierten und infizierten Blättern zeigten. Sie schlussfolgerten, dass VI, die einen roten Wellenlängenbereich enthalten, für Untersuchungen von späteren Infektionsstadien an Bedeutung zu gewinnen scheinen. Denn für diese Untersuchungen stellt der Chlorophyllgehalt ein wichtiges Kriterium dar, wenn die Pigmente abgebaut werden und visuelle Symptome auftreten (vgl. Kapitel A 1.4.1). Konidien erscheinen zudem bei mikroskopischer Betrachtung braun-rötlich, sodass bei hoher Sporenbildung eine erhöhte Reflexion im Bereich des sichtbaren Lichts stattfindet. Der Ctr2 zeigt daher bei hoher Sporenbildung und einem somit hohen sichtbaren, sporulierenden Befall hohe Werte und der Lic2 dementsprechend geringe Werte.

Bei den Untersuchungen der Apfelsämlinge nach Einmalbehandlung in Kombination mit biotischem Stress in Form von *Venturia inaequalis* zeigten die Ergebnisse des Lic2, gemessen

mit dem QST (Abbildung 18), 28 TnB signifikante Unterschiede der Varianten. Dabei zeigte die Variante T2Cu, außer zu drei der Öl-Fungizid-Varianten, höhere Lic2-Werte, was auf einen geringeren Befallsstatus der Variante T2Cu hindeutet. Zwar zeigte die Variante T2Cu auch bei den durch die Bonituren ermittelten SI-Werten ein geringeres Schadbild, allerdings zeigten dies auch die SI-Werte der Varianten L2Cu, L1Cu, L2 und Mi (Abbildung 13). Der Lic2 zeigte in den hier dargestellten Untersuchungen somit keine eindeutigen Ergebnisse zur Schätzung des Infektionsstadiums.

Die Ergebnisse des Ctr2 zeigten bereits 17 TnB signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Varianten (Abbildung 19; Tabelle 30 im Anhang). Es zeigte sich eine Übereinstimmung mit den Bonituren des sichtbaren Schadbildes der Varianten (Abbildung 13). Dabei wies die mit einem relativ starken sichtbaren Schadbild bonitierte Variante L1 (Abbildung 13) auch im Rahmen des Ctr2 kontinuierlich hohe Werte auf (Abbildung 19), was auch durch die Darstellung des Ctr2 auf einen hohen Befallsstatus hindeutet. L1 unterschied sich zudem signifikant höher von den Varianten L2 (17 TnB & 24 TnB) und T2Cu (28 TnB), die auch bei den Bonituren ein geringeres Schadbild aufwiesen. Dies deutet darauf hin, wie von Delalieux et al. (2009a) beschrieben, dass zur Ermittlung von biotischem Blattstress bei Apfelpflanzen, in einem weit entwickelten Infektionsstadium, der Ctr2 herangezogen werden kann.

Allerdings muss ergänzt werden, dass es im Rahmen der Untersuchungen der Apfelsämlinge nach Einmalbehandlung in Kombination mit biotischem Stress in Form von *Venturia inaequalis* zu einer erhöhten Nekrosenbildung der Befallsstellen gekommen ist, wodurch eine Differenzierung schwieriger wurde. Folglich kann ein möglicher Einfluss auf die Werte des Lic2 und Ctr2 nicht gänzlich ausgeschlossen werden, sodass dieser Hinweis bei der Beurteilung der Indices bezüglich des Infektionsstadiums berücksichtigt werden muss.

Die Wellenlängenverhältnisse im Nahinfrarotbereich 1480 nm/ 2135 nm (Delalieux et al., 2009b) und 1500 nm/ 2250 nm dienen der Erkennung von Stress in einem frühen Infektionsstadium (Delalieux et al., 2009a), indem beide Indices Rückschlüsse über den Wassergehalt der Pflanzen liefern (vgl. Kapitel A 1.4.1). Da 14 TnB ein erstes sichtbares Schadbild durch optische Bonituren festgestellt wurde (Abbildung 13), interessierten in den hier dargestellten Untersuchungen der Einmalbehandlung mit zusätzlichem biotischen Stress besonders die Ergebnisse im Bereich dieses Messtermins (Abbildung 20 & 21). Dabei zeigten die Ergebnisse des Index 1500 nm/ 2250 nm 10 TnB signifikante Unterschiede (Abbildung 21; Tabelle 32 im Anhang). Die Variante L1 führte zu diesem Zeitpunkt zu signifikant niedrigeren Werten als das Fungizid (Cu). Nach Delalieux et al. (2009b) weist eine starke Infektion bzw. ein starker späterer Befallsstatus geringe Index-Werte auf. Diese Annahme ließ sich anhand der SI-Werten ab 17 TnB (Abbildung 13) vermuten. Denn ab 17 TnB wies die Variante L1 im Vergleich bereits ein starkes sichtbares Schadbild auf. Zudem zeigte die Kontrolle geringe Werte des Index (1500 nm/ 2250 nm) über die Zeit und wies ebenfalls ab 17 TnB ein hohes

sichtbares Schadbild auf. Dem gegenüber zeigte die Variante T1 keine geringen Werte des Index (1500 nm/ 2250 nm), obwohl sie ebenfalls jeweils ab 17 TnB ein hohes ersichtliches Schadbild aufzeigte. Damit diene der Index 1500 nm/ 2250 nm zwar einer tendenziellen, jedoch keiner eindeutigen Erkennung von Stress in einem frühen Infektionsstadium. Der Index kann zur Ermittlung erster Verdachtsmomente dienen, die durch optische Bonituren ergänzt werden sollten.

Der Index mit dem Wellenlängenverhältnis 1480 nm/ 2135 nm zeigte hingegen erst ab Tag 14 nach Behandlung signifikante Unterschiede (Abbildung 20). Dabei zeigten beispielsweise die Varianten Mi und T1Cu 14 TnB geringere Werte als die Variante L2Cu. 28 TnB hingegen führte die Behandlungsvariante L1Cu zu signifikant geringeren Werten als T2Cu, L2 und Cu. Die Messwerte des Index 1480 nm/ 2135 nm zeigten keine eindeutigen Ergebnisse und ließen zudem keinen Zusammenhang mit den jeweiligen SI-Werte (Abbildung 13) erkennen. Damit diene der Index 1480 nm/ 2135 nm keiner eindeutigen Erkennung von Stress in einem frühen Infektionsstadium.

Auch in diesem Fall muss darauf hingewiesen werden, dass es im Rahmen der Untersuchungen der Apfelsämlinge nach Einmalbehandlung in Kombination mit biotischem Stress in Form von *Venturia inaequalis* zu einer erhöhten Nekrosenbildung der Befallsstellen gekommen ist, wodurch eine Differenzierung erschwert wurde. Folglich kann eine mögliche Auswirkung auf die Werte der Indices (1480 nm/ 2135 nm & 1500 nm/ 2250 nm) nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Der Wassergehalt der Blätter unterlag womöglich neben den vom Pathogen ausgelösten Schwankungen einer zusätzlich erhöhten Transpiration durch die Nekrosenbildung auf den Befallsstellen.

Für die Erkennung von Veränderungen bzw. für Schätzung des Wassergehalts in Blättern kann der MSI herangezogen werden (Ceccato et al., 2001) (vgl. Kapitel A 1.4.1). Bei den Ergebnissen des MSI zeigten sich 31 TnB signifikante Unterschiede der Kontrolle zu den Varianten Mi, L2, T1Cu, L2Cu und L1Cu (Abbildung 22; Tabelle 33 im Anhang). Über den gesamten Messzeitraum von 31 Tagen wies die Kontrolle vergleichsweise mit die höchsten Werte auf und zeigte als eine der Varianten mit dem höchsten sichtbaren Schadbild (Abbildung 13) die geringsten Wassergehalte im Blatt. Die Kutikula als Transpirationsschutz des Blattes wird durch die Sporenbildung und Freigabe der Konidien beschädigt (MacHardy, 1996), sodass eine erhöhte Transpiration stattfindet (Delalieux et al., 2009b) und der Wassergehalt in den Blättern sinkt. Auch Oerke und Steiner (2024) fassten zusammen, dass ein Befall mit *Venturia inaequalis* nach einiger Zeit zu einer Beeinträchtigung der Kutikula und damit einhergehend zu einer erhöhten Transpiration führt. Die Varianten Mi, L2, T1Cu, L2Cu und L1Cu wiesen lediglich am letzten Messtermin signifikant niedrigere MSI-Werte auf (Abbildung 22; Tabelle 33 im Anhang). Diese Daten decken sich mit den SI-Werten (Abbildung 13), bei denen diese Varianten die niedrigsten ersichtlichen Schadbilder aufzeigten, was auf höhere

Wassergehalte im Blatt hindeutet. Die Varianten L1 und T1, die neben der Kontrolle die höchsten sichtbaren Schadbilder zeigten (Abbildung 13), wiesen hingegen keine signifikanten Unterschiede zu den anderen Varianten auf (Abbildung 22; Tabelle 33 im Anhang). Es wird vermutet, dass durch die hohen sichtbaren Schadbilder der Varianten L1 und T1 (Abbildung 13) die Kutikula gestört wurde und somit eine erhöhte Transpiration stattfinden konnte. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, ähnlich wie die Ergebnisse zur Mehrfachbehandlung, dass durch den Einsatz der Öle, als zusätzliche mögliche Schicht, die Transpiration einschränkt wurde und die Öle somit einen Einfluss auf die Wassergehalte hatten, sodass keine signifikant hohen MSI-Werte zu verzeichnen waren.

Aufgrund der bereits erwähnten hohen Nekrosenbildung sollten diese Versuche auch auf weitere Apfelsorten ausgeweitet werden.

Im Rahmen von Untersuchungen zu physiologischen Pflanzenreaktionen wurden weitere Versuche zur Einmalbehandlung mit den Pflanzenölen unter zusätzlichem abiotischen Stress an Buschbohnen durchgeführt. Durch Sensormessungen und anschließende Auswertung der Reflexionsmuster der Buschbohnen nach Einmalbehandlung unter UV-Stress kann der Einfluss der Öle näher betrachtet werden.

Anhand von Abbildung 23A (Kapitel A 3.2.4) konnte beobachtet werden, dass das Reflexionsmuster der mit CutiSan behandelten Pflanzen jeweils mit zusätzlicher UV-Bestrahlung und ohne UV-Bestrahlung leicht über dem Reflexionsmuster der jeweiligen Kontrollvariante lag. Aus Abbildung 23B wurde ersichtlich, dass das Reflexionsmuster der Tungöl-Variante unter zusätzlicher UV-Bestrahlung deutlich über dem Reflexionsmuster der Kontrolle (+UV) verlief. Hinsichtlich der Kombination aus Tungöl und CutiSan (Abbildung 23C) konnte vor allem bei der Variante mit zusätzlicher UV-Bestrahlung festgestellt werden, dass das Reflexionsmuster im Vergleich zur reinen Tungöl-Variante (Abbildung 23B) einen niedrigeren Verlauf aufzeigte. Durch den Verlauf der Reflexionsmuster ließ sich erkennen, dass das CutiSan (Abbildung 23A) einen UV-Schutz vermittelte. Diese Ergebnisse stützen die laut Hersteller angedachte Wirkung von CutiSan®. Bei dem Produkt CutiSan® handelt es sich um ein hochreines, fein vermahlenes Kaolin. Es findet vor allem Anwendung zum Schutz vor Sonnenbrand in unterschiedlichen Kulturen (Biofa, 2023a). Im Gegensatz dazu zeigte das gemessene Reflexionsmuster des Tungöls (Abbildung 23B) eine erhöhte UV-Antwort auf. Diese Erkenntnisse werden durch die Ergebnisse der Kombination aus Tungöl und CutiSan (Abbildung 23C) unterstrichen. Hierbei war zu erkennen, dass das CutiSan, den durch das Tungöl hervorgerufenen Effekt der erhöhten UV-Antwort, zu kompensieren schien. Im Rahmen weiterer Untersuchungen, die in dieser Arbeit nicht dargestellt werden, konnte zudem beobachtet werden, dass mit Leinöl behandelte Pflanzen eine ähnliche Reaktion aufzeigten wie die Pflanzen der Kontroll-Variante. Die beschriebene Wirkung des Tungöls lässt sich auf

den UV-absorbierenden Effekt der im Tungöl enthaltenen α -Elaeostearinsäure zurückführen. Denn die α -Elaeostearinsäure stellt laut Pencreac'h et al. (2002) einen intrinsischen Chromophor mit stark UV-absorbierenden Eigenschaften dar. Dieser Effekt konnte beobachtet werden, nachdem die behandelten Pflanzen für einen Zeitraum von 13 Tagen regelmäßig dem zusätzlichen abiotischen Stressfaktor UV-Licht ausgesetzt gewesen waren. Diese Erkenntnisse lassen abermals die Vermutung zu, dass ein Einsatz von hohen Ölkonzentrationen, vor allem durch die Anwendung des Tungöls, für herbizide Anwendungen geeignet scheint.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollte zudem ein Blick auf zusätzliche VI geworfen werden. Denn die in den Pflanzen enthaltenen Pigmente dienen u.a. der Absorption und Umwandlung von Strahlung bestimmter Wellenlängen z.B. für die Photosynthese (Smolya, 2003) oder auch zum Schutz bei schädigender Strahlung (Tanaka et al., 2008). Jedes Pigment besitzt verschiedene spektrale Absorptionseigenschaften (Raven et al., 2006; Smolyar, 2003). Beispielsweise wird Anthocyanen die Eigenschaft zugeschrieben, die Photoinhibition unter Einfluss von Lichtstress zu verringern. Zudem können sie dazu beitragen, photooxidative Schäden zu reduzieren (Steyn et al., 2002). Da Anthocyane bei vielen Pflanzenarten, wie bereits beschrieben, als Indikatoren für Blattseneszenz und Stress dienen können, kann ihr Nachweis und ihre quantitative Bewertung wichtige Informationen über die Reaktion und Anpassung von Pflanzen an Umweltstress liefern (Gitelson et al., 2001). ARI1-Werte könnten in diesem Rahmen wertvolle ergänzende Informationen liefern, um die vorliegenden Erkenntnisse zu untermauern.

5 Fazit

Aufgrund der allgemeinen Erkenntnisse zum physiologischen Zustand von Pflanzen, der beschriebenen Erkenntnis von Pflanzenölen und ihrer Wirkung auf den Zustand von Pflanzen und der bisher bekannten Wirkung bezüglich ihrer Phytotoxizität wurden die Hypothesen aufgestellt, dass die physiologische Wirkung trocknender Pflanzenöle auf Pflanzen von der Konzentration, Applikationsmenge sowie von zusätzlichen biotischen und abiotischen Stressfaktoren abhängt (**H1**) und, dass diese physiologische Wirkung mit Hilfe von Sensoren gemessen werden kann und sich in veränderten Vegetationsindices und Reflexionsmustern widerspiegelt (**H2**).

Die in Kapitel A 3 dargestellten Ergebnisse geben vor allem Aufschluss über die Wirkung der zwei trocknenden Pflanzenöle Leinöl und Tungöl hinsichtlich des physiologischen Zustandes von Pflanzen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse der Mehrfachbehandlung darauf hindeuten, dass die eingesetzten Applikationsmengen und Konzentrationen eine hohe Pflanzenverträglichkeit aufzeigen. Es lässt sich ein Potenzial der trocknenden Pflanzenöle als Pflanzenschutzmittel oder Pflanzenstärkungsmittel erkennen. Teilweise wurde festgestellt, dass die Pflanzenöle eine leichte Stressreaktion in den Pflanzen auslöste und, dass die Öle einen möglichen Einfluss auf die Stomata und somit auf die Transpiration der Blätter haben können.

Darüber hinaus lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse der Einfachbehandlung mit zusätzlichem biotischen Stress in Form von *Venturia inaequalis* darauf hindeuten, dass unterschiedliche VI zur Beurteilung des physiologischen Zustandes der Pflanzen herangezogen werden können. Es hat sich gezeigt, dass sich beispielsweise der PRI, Ctr2 oder der MSI als sinnvolle Indices als Ergänzungen zu optischen Bonituren und SI-Werten eignen. Darüber hinaus konnte durch die Auswertung einiger untersuchter VI festgestellt werden, dass eine Kombination aus Tungöl und dem Fungizid (Cu) zu einem geringeren sichtbaren Schadbild und einem geringen Stressstatus der Pflanzen führte als beispielsweise die reinen Tungöl-Varianten. Diese Erkenntnis lässt sich gegebenenfalls durch die Wirkung des Fungizids (Cu) und die mögliche, zuvor beschriebene, pflanzenstärkende Wirkung des Tungöls erklären. Zudem zeigten im Rahmen der Untersuchungen vor allem die reinen Öl-Varianten L1 und T1 neben der Kontrolle die höchsten sichtbaren Schadbilder (SI-Werte). Allerdings konnte der in diesen Fällen vermutete höhere Stressstatus der Pflanzen nicht durch alle dargestellten VI bestätigt werden. Besonders im Rahmen der Auswertung des MSI ließ sich erkennen, dass die bei hohen ersichtlichen Schadbildern zu erwartende hohe Transpiration ausblieb. Auf dieser Grundlage besteht die Vermutung, dass die Öle durch ihre Eigenschaften eine Schicht auf den Blättern bilden, die als Transpirationsschutz dienen kann.

Im Rahmen der Untersuchungen zur physiologischen Pflanzenreaktion nach einmaliger Ölbehandlung unter zusätzlichem abiotischen Stress in Form von UV-Licht, ist zu ergänzen, dass die Ergebnisse gezeigt haben, dass das Tungöl eine erhöhte UV-Antwort aufzeigte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die dargestellten Erkenntnisse über die physiologische Wirkung der Pflanzenöle mit Hilfe von Sensoren gemessen und durch unterschiedliche VI und Reflexionsmuster abgebildet werden konnten. Es ist zudem zu erwähnen, dass überwiegend das Tungöl unter bestimmten Umwelteinflüssen eine mögliche pflanzenstärkende Wirkung aufzeigte und, dass beispielsweise unter zusätzlichen abiotischen Faktoren durch das Tungöl auch eine Stressreaktion in den Pflanzen hervorgerufen werden konnte. Das Tungöl weist je nach Einsatzgebiet folglich ein hohes Potenzial für den integrierten Pflanzenschutz auf. Eine mögliche Anwendung im Bereich Pflanzenstärkung oder auch als Herbizid im Bereich Pflanzenschutz ist nach den hier dargestellten Ergebnissen denkbar. Aber auch das Leinöl birgt, vor allem durch seinen ebenfalls vermuteten Transpirationsschutz, ein hohes Potenzial im Bereich integrierter Pflanzenschutz. Aufgrund ihrer Eigenschaften und den hier dargestellten Ergebnissen sind die Voraussetzungen für den Einsatz von glyceridischen Pflanzenölen als „Biorationals“ gegeben.

B Fungizide Wirkung trocknender Pflanzenöle

1 Einleitung

Der Bohnenrost (*Uromyces appendiculatus*) ist eine weltweit verbreitete und bedeutende Krankheit an Bohnen (*Phaseolus* L.), die überwiegend in tropischen und subtropischen Regionen vorkommt. (Agrios, 2004; Liebenberg & Pretorius, 2010). Abhängig vom Zeitpunkt und der Schwere der Infektion kann es dabei zu fast vollständigen Ernteaussfällen kommen (Agrios, 2004). Allerdings ist die Wirksamkeit von Fungiziden zur Verringerung von Ertragsverlusten durch Rost an Bohnen bereits gut untersucht (Liebenberg & Pretorius, 2010). Mehrere Fungizide bieten dabei eine zufriedenstellende Kontrolle gegenüber dem Bohnenrost (Agrios, 2004). Aber auch Resistenzzüchtungen, biologische Kontrollmaßnahmen und die Möglichkeit der induzierten Resistenz dienen zur Bekämpfung des Bohnenrostes (Liebenberg & Pretorius, 2010).

Der übermäßige Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Allgemeinen führt hingegen auch zu unterschiedlichen Umweltproblemen. Begründet ist dies zum einen durch die hohe Toxizität und die nicht biologisch abbaubaren Eigenschaften der Produkte, zum anderen kommt es zu Rückständen im Boden, im Wasser und in den Kulturen. Daher müssen auf der einen Seite neue, hochselektive und biologisch abbaubare Pflanzenschutzmittel entwickelt und untersucht werden, um die Probleme einer Langzeittoxizität zu lösen. Auf der anderen Seite müssen umweltfreundliche Produkte untersucht und Techniken entwickelt werden, mit denen der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bei gleichbleibenden Erträgen verringert werden kann. Natürliche Produkte sind eine vorteilhafte Alternative zu synthetischen Pflanzenschutzmitteln, um die negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren (Koul et al., 2008).

Im biologischen Anbau sind Fungizide dieser Art bisher nicht zugelassen. Zur biologischen Kontrolle von *Uromyces appendiculatus* werden lediglich z.B. Bakterien wie *Bacillus subtilis* (Baker et al., 1983; Baker et al., 1985) oder der Pilz *Verticillium lecanii* (Allen, 1982) eingesetzt. Um das begrenzte Angebot an Bekämpfungsmöglichkeiten, besonders in der ökologischen Landwirtschaft, auszuweiten, sollte daher nach neuen Lösungswegen gesucht werden. Auch Rapsöl, als bereits zugelassenes Pflanzenschutzmittel, bildet einen guten Ausgangspunkt für weitere Forschung (Roth & Kormann, 2000). Obwohl es bereits einige Untersuchungen mit vielversprechenden Ergebnissen zu glyceridischen Pflanzenölen als Fungizide gibt (vgl. Kapitel B 1.2), sind laut Datenbank für zugelassene Pflanzenschutzmittel vom BVL derzeit keine Mittel auf Basis von Pflanzenölen als Fungizide zugelassen (BVL, 2023b).

Natürliche Produkte wie glyceridische Pflanzenöle (Ah Chee et al., 2018) sind vielversprechende Kandidaten für einen nachhaltigen Ansatz, da sie für den Menschen kaum toxisch, biologisch gut abbaubar (Lligadas et al., 2013), in ihrer Zusammensetzung veränderbar, mit anderen Stoffen oder Flüssigkeiten mischbar (Alam et al., 2014) und in der Umwelt nicht langlebig sind (Horowitz et al., 2009). Mit Blick in die Zukunft stellen glyceridische

Pflanzenöle daher eine gute Alternative mit Potenzial für den Einsatz im integrierten oder ökologischen Pflanzenschutz dar.

1.1 Vorkommen und Biologie von *Uromyces appendiculatus*

Bohnenrost ist weltweit vertreten, kommt aber häufiger und stärker in feucht tropischen und subtropischen Regionen vor. Abhängig von Zeitpunkt und Schwere der Infektion kann es hierbei zu fast vollständigen Ernteaussfällen kommen (Agrios, 2004). Der Erreger des Bohnenrostes *Uromyces appendiculatus* wurde erstmals in Deutschland von Persoon im Jahre 1795 beschrieben. Zu diesem Zeitpunkt lautete die Bezeichnung des Pathogens *Uredo appendiculata phaseoli* (Liebenberg & Pretorius, 2010). Die derzeitige Bezeichnung lautet *Uromyces appendiculatus* (Pers.:Pers.) Unger var. *appendiculatus* (Boerema et al., 1993; Liebenberg & Pretorius, 2010). *Uromyces appendiculatus* zählt zur Abteilung der Basidiomyceten, zur Familie Pucciniaceae und ist darunter zugehörig zur Gattung *Uromyces* (Verreet & Dehne, 2013). *Uromyces appendiculatus* ist autözisch, durchläuft einen makrozyklischen Lebenszyklus und produziert alle Sporenstadien wie Spermatien, Aecidiosporen, Uredosporen, Teleutosporen und Basidiosporen auf der gleichen Wirtspflanze, der Bohne (*Phaseolus* L.) (Agrios, 2004; Verreet & Dehne, 2013).

Die Uredosporen keimen auf der Oberfläche des Blattes oder eines anderen oberirdischen Pflanzenteils und der Keimschlauch, der an die Blattoberfläche angeheftet ist, wächst über die Epidermis, bis er ein Stoma erreicht (Liebenberg & Pretorius, 2010). Anschließend bildet sich über dem Stoma ein Appressorium aus, wobei die sich verändernde Beschaffenheit der Oberfläche über den Stomata eine Rolle zu spielen scheint (Liebenberg & Pretorius, 2010; Wynn, 1976). Nachdem ein Infektionskeil durch die Spaltöffnung gewachsen ist, verdickt er sich zu einem substomatären Vesikel (Fink et al., 1989; Mendgen, 1978). Im Anschluss bildet sich vom substomatären Vesikel eine Infektionshypha aus, die bis in die Mitte des Blattes wächst. Durch einen ständigen Kontakt mit einer Wirtszelle entsteht eine Haustorienmutterzelle, die durch einen Penetrationskeil in die Wirtszellen eindringt und dort Haustorien ausbildet (Mendgen, 1978). Ab hier beginnt die biotrophe, parasitische Phase des Pilzes, der über die Ausbildung der Haustorien dem Wirt nun Nährstoffe entziehen kann (Fink et al., 1989).

Bei einer Infektion bestehen die Symptome zunächst aus weißen Pusteln auf den Blattunterseiten (Hallmann et al., 2009). Anschließend bilden sich auf den Blattoberseiten zahlreiche rotbraune, kreisförmige Pusteln, die aus Sporenlagern mit einem Durchmesser von etwa ein bis zwei Millimetern bestehen (Agrios, 2004; Hallmann et al., 2009). Diese Symptome bilden sich auf den Blättern und auch auf Hülsen aus. Die Pusteln platzen anschließend auf und setzen rotbraune Uredosporen und später schwarze Teleutosporen frei (Agrios, 2004). Oft färbt sich das Gewebe gelb, das die Gruppen von Sporenlagern umgibt, und bildet einen

chlorotischen Hof (Agrios, 2004; Verreet & Dehne, 2013). Stark infizierte Blätter können zudem einreißen, sodass Teile davon abfallen. Gleichzeitig bleiben infizierte Pflanzen klein und erbringen nur geringe Erträge (Agrios, 2004). Der Erreger kann an Pflanzenrückständen und Bohnenstangen überwintern (Verreet & Dehne, 2013).

1.1.1 Bekämpfungsmaßnahmen gegen Bohnenrost

Chemische Maßnahmen

Laut Liebenberg und Pretorius (2010) ist die Wirksamkeit von Fungiziden zur Verringerung von Ertragsverlusten durch Rost an Bohnen gut untersucht und dokumentiert. Mehrere Fungizide bieten eine zufriedenstellende Kontrolle gegenüber Bohnenrost (Agrios, 2004). Systemische Fungizide aus der Gruppe der Triazole z.B. mit den Wirkstoffen Difenoconazol oder Tebuconazol sind in Deutschland für die Anwendung gegen Bohnenrost zugelassen (BVL, 2023b). Liebenberg und Pretorius (2010) fassten die Untersuchungen von Strauss und Killian (1996) zusammen. In diesen Untersuchungen bewerteten Strauss und Killian (1996) unterschiedliche Fungizide zur Bekämpfung von Rost an Bohnen und erläuterten hierbei auch die Wirkung von Triazolen. Zudem empfahlen sie eine Anwendung von Produkten aus der Gruppe der Triazole in 14-tägigen Intervallen, ab sechs Wochen nach der Aussaat, für eine gute Kontrolle bei anfälligen Sorten unter hohem Rostdruck. Darüber hinaus erwähnen Liebenberg und Pretorius (2010) auch systemische Fungizide aus der Gruppe der Benzimidazole, wie z.B. den Wirkstoff Thiophanat-methyl, zur Bekämpfung des Bohnenrostes. Nach Yuen et al. (2001) kann mit dem Mittel Topsin® (i.a. Thiophanat-methyl) Bohnenrost erfolgreich bekämpft werden. Topsin® war in Deutschland noch bis Oktober 2021 zugelassen (BVL, 2023c), allerdings nicht für den Einsatz gegen Bohnenrost. Neben diesen beiden Gruppen von systemischen Fungiziden finden auch Carboxamide Anwendung in der Bekämpfung von Bohnenrost (Liebenberg & Pretorius, 2010). Unter anderem gehören Wirkstoffe wie Oxycarboxin oder Azoxystrobin zu dieser Gruppe (Liebenberg & Pretorius, 2010), wobei Azoxystrobin derzeit in Deutschland zugelassen ist (BVL, 2023b). Sharma et al. (2018) konnten zeigen, dass der Wirkstoff Azoxystrobin, unter in vivo Bedingungen, den Rostbefall im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle signifikant reduzieren konnte. In der Kontrolle lag der Befall bei ca. 50% und nach Behandlung mit Azoxystrobin konnte der Befall auf ca. 5% reduziert werden (Sharma et al., 2018).

Des Weiteren gibt es auch die Möglichkeit einer erfolgreichen Bekämpfung durch den Einsatz von Kontaktfungiziden. Zusammengefasst nach Liebenberg und Pretorius (2010) zählen hierzu zum einen Produkte auf Basis von anorganischen Stoffen, wie Schwefel, oder Wirkstoffe aus der Gruppe der Chloronitrile, wie z.B. Chlorothalonil. Zum anderen zählen hierzu Produkte aus der Gruppe der Dithiocarbamate, wie z.B. die Wirkstoffe Mancozeb oder Metiram, wobei Schwefel und Metiram derzeit in Deutschland als Kontaktfungizide zugelassen

sind (BVL, 2023b). Die Europäische Kommission hat z.B. die Zulassung von Chlorothalonil als Wirkstoff mit der Durchführungsverordnung (EU) 2019/677 widerrufen, sodass Produkte mit diesem Wirkstoff nach Ende der Aufbrauchsfrist (Mai 2020) in der EU nicht mehr eingesetzt werden dürfen (Durchführungsverordnung (EU) 2019/677). Explizit zugelassen für die Bekämpfung von Bohnenrost ist von den hier aufgeführten Kontaktfungiziden derzeit laut Datenbank des BVL der Wirkstoff Metiram (BVL, 2023b).

Neben der eradikativen Wirkung stellen Fungizide eine chemisch-toxische Barriere gegenüber Krankheitserregern dar und sind somit ein unverzichtbares Mittel zur Bekämpfung vieler Pflanzenkrankheiten (Sharma et al., 2018). Systemische Fungizide besitzen jedoch ein mittleres bis hohes Risiko, Resistenzen gegenüber den Wirkstoffen zu bilden. Kontaktfungizide besitzen ein vergleichbar geringes Risiko, dass sich Resistenzen entwickeln (Liebenberg & Pretorius, 2010). Insgesamt sind laut Datenbank des BVL derzeit 75 Mittel (Stand: 18.07.2023) aus dem Wirkungsbereich der Fungizide für die Bekämpfung des Bohnenrostes in Deutschland zugelassen. Neben den bisher beschriebenen Wirkstoffen zählen dazu u.a. auch die Wirkstoffe Trifloxystrobin und Kupferoxychlorid (BVL, 2023b).

Biologische Maßnahmen

Über die chemischen Maßnahmen hinausgehend, besteht zur Bekämpfung des Bohnenrostes auch die Möglichkeit einer biologischen Kontrolle und die Möglichkeit der induzierten Resistenz (Liebenberg & Pretorius, 2010). Zur biologischen Kontrolle von *Uromyces appendiculatus* gehört zum einen der Einsatz von Bakterien wie *Bacillus subtilis* (Baker et al., 1983; Baker et al., 1985), zum anderen der Pilz *Verticillium lecanii* (Allen, 1982). Darüber hinaus untersuchten Yuen et al. (2001) unterschiedliche Bakterienstämme und stellten fest, dass ein Stamm von *Pantoea agglomerans* und von *Stenotrophomonas maltophilia* in mehreren Experimenten für eine Reduktion des Bohnenrostes effektiv waren.

Bei der induzierten Resistenz hingegen geht es um die natürliche Widerstandsfähigkeit von Pflanzen, die gesteigert werden kann, ohne dass der genetische Aufbau dieser verändert wird. Durch induzierte Resistenz kann sowohl die Befallsintensität als auch die Schadwirkung eines Befalls verringert werden. Durch den Einsatz bestimmter Induktoren können somit latente Resistenzmechanismen in Pflanzen angeregt werden (Schönbeck et al., 1993). Nach Iriti und Faoro (2003) kann z.B. Benzol-[1,2,3]-thiadiazol-7-carbothioat-S-methyl (BTH) eingesetzt werden, um in unterschiedlichen Bohnensorten eine Resistenz gegen Bohnenrost zu induzieren. Hierbei war eine einmalige BTH-Spritzung sieben Tage vor der Inokulation ausreichend, um die Krankheit bei den untersuchten Sorten zu kontrollieren. Darüber hinaus induziert das Aminosäurederivat N^ε-Trimethyl-L-Lysin (TML) in Bohnenpflanzen eine Resistenz gegen den biotrophen Pilz *Uromyces phaseoli*. Die Wirkung ist jedoch abhängig

vom Zeitpunkt zwischen Behandlung und Inokulation sowie von der Dosierung (Tyihak et al., 1989).

Physikalische Maßnahmen

Auch unterschiedliche kulturelle Maßnahmen, wie eine geeignete Fruchtfolge mit Nicht-Wirtspflanzen (Agrios, 2004) bzw. der Einsatz von Zwischenfrüchten und Mischkulturen (Liebenberg & Pretorius, 2010), eignen sich als Maßnahmen gegen den Bohnenrost. Eine weitere mögliche Strategie zur Rostbekämpfung ist die Verwendung von Saatgutmischungen und Multilinen, die eine Reihe von Resistenzen enthalten (Browning & Frey, 1969; Liebenberg & Pretorius, 2010). Zusätzlich kann es auch von Vorteil sein, die Bestandsdichte auszuweiten (Hallmann et al., 2009) und Pflanzenreste zu beseitigen, damit zukünftige Infektionen reduziert werden können (Agrios, 2004). Auch lohnt es sich den Pflanztermin zu variieren, damit sich günstige Bedingungen für *Uromyces appendiculatus* und besonders anfällige Phasen der Pflanze nicht überschneiden (Liebenberg & Pretorius, 2010). Eine weitere mögliche Maßnahme zur Bekämpfung des Bohnenrostes basiert auf der Sortenwahl. Es sollten je nach Region, in der die Bohnen angebaut werden sollen, resistente Sorten gegen die vorhandenen Arten des Erregers ausgewählt werden (Agrios, 2004). Daraus folgt, dass die Resistenzzüchtung einen wichtigen Punkt in der Bekämpfung von Bohnenrost darstellt. Besonders der Einbau von Mehrfachresistenzgenen in lokal angepasste Sorten steht hierbei als eine kostengünstige Bekämpfungsmaßnahme zur Verfügung (Liebenberg et al., 2005). Dazu zählt z.B. die artspezifische Resistenz, die hervorgerufen wird durch den Einbau wichtiger vorherrschender Gene (Liebenberg et al., 2005; Stavely, 1986). Darüber hinaus gibt es auch die Möglichkeit der artunspezifischen Resistenz (Vanderplank, 1984; Liebenberg & Pretorius, 2010) oder der „Marker-gestützten“ Züchtung z.B. im Bereich der Phänotypisierung (Bassett, 1988; Liebenberg & Pretorius, 2010). Dennoch verlieren einige Sorten ihre Resistenz, wenn neue Arten des Erregers auftreten (Liebenberg & Pretorius, 2010).

Allgemein gilt auch bei der Bekämpfung des Bohnenrostes, dass einzelne Maßnahmen nicht so wirksam sind wie die Kombination unterschiedlicher Strategien. Jacobsen (1997) diskutierte die Rolle der Pflanzenpathologie im integrierten Pflanzenschutz (IPS) und definierte den integrierten Pflanzenschutz als einen nachhaltigen Ansatz zur Schädlings- bzw. Krankheitsbekämpfung durch die Kombination von biologischen, kulturellen, physikalischen und chemischen Werkzeugen in einer Weise, die wirtschaftliche, gesundheitliche und ökologische Risiken minimiert. Schwartz und Peairs (1999) zeigten auf, dass bis dahin eine vereinfachte Zusammenstellung der IPS-Strategien für den Bereich Bohnen primär auf dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, Pflanzenresistenzen und kulturellen Maßnahmen beruhten. Darüber hinaus sollte mehr Wert auf den Bereich des Technologietransfers und den

Einsatz von Vorhersagemodellen gelegt werden. Diese Bereiche basieren auf einer effektiven Erkundung, Verfolgung und Vorhersage von Krankheiten im integrierten Management. Insgesamt sollten daher immer mehrere Bekämpfungsstrategien in Betracht gezogen werden (Schwartz & Peairs, 1999).

1.2 Pflanzenöle als Fungizide

Auch mit der Wirkung diverser Pflanzenöle als Fungizide beschäftigt sich die Wissenschaft. Im Zuge dessen gibt es bereits verschiedene Untersuchungen zu ätherischen Pflanzenölen, die gegenüber unterschiedlichen Pathogenen eingesetzt werden (Koul et al., 2008; Tomazoni et al., 2017). Da diese, wie in Kapitel A 1.1 bereits beschrieben, auf einem anderen Wirkungsmechanismus als glyceridische Pflanzenöle beruhen, werden sie in diesem Kapitel nicht mit aufgenommen.

Durch den Einsatz unterschiedlicher glyceridischer Pflanzenöle konnten bereits fungizide Wirkungen gezeigt werden. Ah Chee et al. (2018) konnten z.B. durch den Einsatz von Sojaöl den Echten Mehltau (*Sphaerotheca fuliginea*) an Kürbisgewächsen kontrollieren. Northover und Schneider (1993) erzielten durch die Anwendung unterschiedlicher glyceridischer Pflanzenöle, wie z.B. Sonnenblumenöl, Olivenöl, Sojaöl oder Rapsöl, eine hohe Wirkung von bis zu 99% bei der Kontrolle von Echtem Mehltau (*Podosphaera leucotricha*) an Äpfeln, wenn die Öle einen Tag vor oder nach der Inokulation ausgebracht wurden. Darüber hinaus untersuchten Martin und Salmon (1933) zwölf unterschiedliche glyceridische Pflanzenöle hinsichtlich ihrer fungiziden Wirkung gegenüber Hopfenmehltau (*Sphaerotheca humuli*). Zum Einsatz kamen hierbei u.a. Sojabohnenöl, Mohnöl, Olivenöl oder Rapsöl. Produkte auf Basis von Rapsöl sind, wie bereits in Kapitel A 1.2 beschrieben, derzeit als Pflanzenschutzmittel, auch im ökologischen Landbau, zugelassen. Allerdings gilt die Zulassung hierbei nur für die Anwendung als Insektizid und Akarizid (BVL, 2023a).

Anders als das halbtrocknende Rapsöl (Roth & Kormann, 2005) zeichnen sich trocknende Pflanzenöle durch ihren hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren aus (Meier et al., 2007; Roth & Kormann, 2005), die für die Filmbildung (Yang et al., 2015) auf Oberflächen durch schnelle autoxidative Trocknung durch den Kontakt mit Sauerstoff verantwortlich sind (Derksen et al., 1995; Oyman et al., 2005; Soucek et al., 2012). Bereits 1943 zeigten Clayton et al., dass durch trocknende, glyceridische Pflanzenöle, wie z.B. dem Leinöl und Tungöl, der durch *Peronospora tabacina* verursachte Blauschimmel an Tabak reduziert werden konnte. Sie schlussfolgerten, dass die Fettsäurezusammensetzung für die fungizide Wirkung von Bedeutung sein könnte. Darüber hinaus beschrieb auch Arslan (2014), dass eine protektive Anwendung von Leinöl, bei einer Konzentration von 1%, eine Infektion von *Uromyces appendiculatus* unter Freilandbedingungen reduzieren kann. Chen und Ko (2015) fanden zudem heraus, dass Leinöl die Keimschlauchlänge von Erdnussrost reduziert und die Bildung

des Appressoriums unterdrückt. Auch in den bereits erwähnten Untersuchungen von Martin und Salmon (1933) kam Leinöl zum Einsatz. Sie zeigten in einer Versuchsreihe mit einer Ölkonzentration von 1% eine fungizide Wirkung gegenüber Hopfenmehltau (*Sphaerotheca humuli*). Darüber hinaus konnten Jamar et al. (2007) durch eine Anwendung mit 0,5% Leinöl eine Infektion mit *Venturia inaequalis* signifikant reduzieren.

Trotz einiger Untersuchungen mit vielversprechenden Ergebnissen zu glyceridischen Pflanzenölen als Fungizide, sind laut Datenbank für zugelassene Pflanzenschutzmittel vom BVL derzeit keine Mittel auf Basis von Pflanzenölen als Fungizide zugelassen (BVL, 2023b).

1.3 Hypothesen

Aufgrund der beschriebenen Filmbildung (Kapitel B 1.2) und der bisher bekannten Wirkung von trocknenden Pflanzenölen wurden die Hypothesen aufgestellt, dass durch den Einsatz trocknender Pflanzenöle ein pilzlicher Befall reduziert werden kann (**H1**) und, dass diese Wirkung gegenüber Pathogenen vom Applikationszeitpunkt der Öle (**H2**) abhängt. Darüber hinaus wurde vermutet, dass sich die fungizide Wirkung trocknender Pflanzenöle gegenüber der Wirkung halbtrocknender bzw. nicht-trocknender Pflanzenöle unterscheidet und die fungizide Wirkung somit von der Art des Öls, seiner Trocknungsklasse und Fettsäurezusammensetzung abhängt (**H3**).

2 Material und Methoden

Um diese Hypothesen zur Wirkung der Pflanzenöle in Bezug auf Pathogene zu untersuchen, wurden am Beispiel von *Uromyces appendiculatus* (Bohnenrost) an Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) unterschiedliche in vivo Versuchsreihen durchgeführt. In allen Versuchsreihen wurde, neben den Öl-Varianten, zusätzlich immer eine unbehandelte Kontrollgruppe (K) zum direkten Vergleich mitgeführt.

2.1 Versuche zur fungiziden Wirkung der Öle gegenüber *Uromyces appendiculatus*

Die folgenden Versuche wurden am Modellsystem der Buschbohne (*Phaseolus vulgaris* L.) mit der Sorte „Saxa“, realisiert. Aufgrund ihrer großen Primärblätter eignet sich die Buschbohne gut für Translokations- und Positionsversuche (Kraska, 1996). Unter kontrollierten Bedingungen waren folglich verschiedene Untersuchungen zur fungiziden Wirkung trocknender Pflanzenöle an der Buschbohne realisierbar.

2.1.1 Pflanzenanzucht

Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) der Sorte „Saxa“ wurden in 10er Töpfen in kommerziellem Kultursubstrat (Profisubstrat, Einheitserde Classic, Typ ED 73 (Weißtorf

(Hochmoortorf) und Lehm)) ausgesät. Im Anschluss wurden alle Töpfe auf Ebbe-Flut-Tischen im Gewächshaus am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn platziert. Die Anzucht der Buschbohnen erfolgte für drei Wochen unter kontrollierten Bedingungen ($18 \pm 1^\circ\text{C}$ in der Nacht und $20 \pm 2^\circ\text{C}$ am Tag, 12 h Licht pro Tag) und täglicher Bewässerung.

2.1.2 Testpathogen, Inokulation und Bewertung

Von der Pflanzenpathologie des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn wurden Uredosporen des Pathogens *Uromyces appendiculatus* zur Verfügung gestellt. Die Uredosporen wurden vorsichtig mit einem Pinsel von der Oberfläche rostinfizierter Blätter abgelöst und bis zur Verwendung in einem Gefrierschrank bei -18°C gelagert. Für die Inokulation wurde die Uredosporenkonzentration mit einem Hämozytometer bestimmt und auf eine Sporendichte von 6×10^4 Sporen mL^{-1} eingestellt, was eine ausreichende und zuverlässige Anzahl von Rostpusteln in der Kontrolle ergab. Die Sporen wurden durch Zugabe von 0,01% des Netzmittels Tween® 20 (Merck Group, Darmstadt) in Wasser suspendiert. In Anlehnung an das Verfahren von Bassanezi et al. (2001) wurden die Primärblätter der drei Wochen alten Buschbohnen mit der Sporensuspension bis zum Abtropfen mit Handsprühern gleichmäßig eingesprüht. Die inokulierten Pflanzen wurden anschließend in Schalen mit Wasser platziert und mit Polyethylenabdeckungen abgedeckt. Dieses Vorgehen diente dazu, die Luftfeuchtigkeit zu erhöhen und somit die Infektion zu erleichtern. Die abgedeckten Pflanzen wurden bei $19 \pm 1^\circ\text{C}$ für 48 h im Dunkeln aufgestellt. Danach wurden die Polyethylenabdeckungen wieder entfernt und die inokulierten Pflanzen unter kontrollierten Gewächshausbedingungen weiter kultiviert. Der Befallsgrad der Krankheit wurde 10-14 Tage nach der Inokulation bestimmt, als Rostpusteln auf den Pflanzen sichtbar waren. Für die Bestimmung des Befallsgrades wurde die Anzahl der Pilzkolonien pro Quadratzentimeter der Blattfläche an vier zufälligen Stellen pro Pflanze mit einer runden Schablone in fünffacher Wiederholung pro Behandlung ausgezählt und anschließend die Wirksamkeit nach Abbott (1925) berechnet. Die beschriebene Inokulation der Buschbohnen fand je nach Versuchsaufbau (s. Kapitel B 2.1.3–2.1.7) zur protektiven und kurativen Wirkung der Öle entsprechend vor oder nach der jeweiligen Ölbehandlung statt.

2.1.3 Versuchsdurchführung

Die Applikation der verwendeten Pflanzenöle erfolgte in den Versuchsreihen zur fungiziden Wirkung an Buschbohnen, wenn nicht anders erwähnt, einmalig mit Handsprühern auf der abaxialen und adaxialen Seite der Primärblätter, bis zum Abtropfen. Die Herstellung der Öle erfolgte nach der Beschreibung in Kapitel A 2.1.2. Verwendet wurden gleichmäßig entwickelte, drei Wochen alte Buschbohnen. Die Kontrollgruppe und die kommerziellen

Vergleichsprodukte wurden auf die gleiche Weise appliziert. In Tabelle 9 sind alle Informationen der verwendeten Pflanzenöle und kommerziellen Produkte, deren Abkürzungen, Mischungsverhältnisse und Ölkonzentrationen für die Untersuchungen zur fungiziden Wirkung gegenüber *Uromyces appendiculatus* aufgeführt.

Insgesamt wurde die Applikation der Varianten (mit Ausnahme des Translokationsversuchs), die Pathogeninokulation und die Krankheitsbeurteilung, wie zuvor beschrieben, für alle in vivo Pathogenversuche mit *Uromyces appendiculatus* gleich durchgeführt. Alle Versuche wurden in randomisierter Form angelegt, um mögliche Randeffekte und etwaige Einflüsse ausschließen zu können. Wenn nicht anders erwähnt, wurden alle Varianten pro Versuchsreihe in fünffacher Wiederholung durchgeführt.

Tabelle 9: Informationen über die getesteten Pflanzenöle und kommerziellen Produkte, verwendeten Abkürzungen aller Behandlungsvarianten, das Verhältnis der eingesetzten Ölmischungen sowie über die getesteten Ölkonzentrationen und Wirkstoffe der kommerziellen Produkte der Untersuchungen zur fungiziden Wirkung gegenüber *Uromyces appendiculatus* an Buschbohnen.

Pflanzenöl	Abkürzung	Mischungsverhältnis	Gesamt-Öl-Konzentration ¹
Lein	L	-	2%
Lein	L	-	0,5%, 1%, 2%, 5% ²
Tung	T	-	2%
Raps	R	-	2%
Raps	R	-	0,5%, 1%, 2%, 5% ²
Lein : Tung	LT(1)	50 : 50	2%
Lein : Tung	LT(2)	80 : 20	2%
Lein : Tung	LT(3)	95 : 5	2%
Lein : Tung : Raps	LTR	47,5 : 5 : 47,5	2%
Kommerzielles Produkt	Abkürzung	-	Wirkstoff
Funguran® progress	Cu	-	537 g/kg Cu(OH) ₂
Micula®	Mi	-	85% emulgiertes Rapsöl
Flint®	Fu	-	500 g/kg Trifloxystrobin
Kontrolle	K	-	-

¹ Finaler Ölgehalt in der Öl-Wasser-Emulsion. ² Konzentrationen, die für Dosis-Wirkungs-Versuche verwendet wurden.

2.1.4 Versuche zur Dosis-Wirkungs-Beziehung

Zur Beurteilung der Dosis-Wirkungs-Beziehung wurden vier Konzentrationen (0,5%, 1%, 2% und 5%) von Leinöl (L) und Rapsöl (R) verwendet (Tabelle 9). Alle Pflanzenöle wurden 2dbi (days before inoculation) nach dem zuvor beschriebenen Vorgehen appliziert. Zum Vergleich wurde eine unbehandelte Kontrolle herangezogen.

2.1.5 Versuche zur Translokation

Als nächstes wurden mögliche systemische Effekte der Pflanzenöle L und R im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle untersucht. Diese Untersuchungen zur Translokation der Wirkung wurden pro Primärblatt an einer Buschbohne durchgeführt. Hierfür wurde eine Hälfte des jeweiligen Primärblattes der Buschbohnen 2dbi mit zweiprozentigen Konzentrationen des jeweiligen Öls behandelt. Die distale Blatthälfte wurde dabei einige Sekunden in das Ölpräparat getaucht, die obere Hälfte pro Primärblatt blieb somit unbehandelt. Nach der Applikation wurden die Pflanzen vorsichtig gehandhabt, denn es sollte vermieden werden, dass das Öl auf die jeweils unbehandelte Blatthälfte verlief.

2.1.6 Versuche zum Applikationszeitpunkt

Um die protektive und kurative Wirkung der Pflanzenöle zu untersuchen, wurde zunächst ein Versuch mit einem ausgedehnten Intervall der Applikationszeitpunkte angelegt. Insgesamt wurden hierbei jeweils 2% des trocknenden L und T und des halbtrocknenden R verwendet und mit drei kommerziellen Produkten sowie einer unbehandelten Kontrolle verglichen. Aufgrund erster Ergebnisse aus den Versuchen zur Dosis-Wirkungs-Beziehung und Ergebnissen zur Phytotoxizität aus Kapitel A 3.1 wurde für alle weiteren Versuchsreihen mit Bohnenrost eine Konzentration von 2% des jeweiligen Öls gewählt.

Zum Einsatz kamen in dieser Versuchsreihe Funguran® progress (Cu) (a.i.: 537 g/kg Kupferhydroxid, Biofa), Micula® (Mi) (a.i.: 85% emulgiertes Rapsöl, Biofa) und Flint® (Fu) (a.i.: 500 g/kg Trifloxystrobin, Bayer CropScience) (Tabelle 9). Funguran® progress und Micula® wurden ausgewählt, da diese Produkte auch im ökologischen Landbau zugelassen sind (BVL, 2023a). Die drei Vergleichspräparate wurden entsprechend den Herstellerempfehlungen eingesetzt. Für die Untersuchung der protektiven Wirkung wurden Applikationsintervalle von sechs Tagen (6dbi), vier Tagen (4dbi) sowie zwei Tagen (2dbi) vor der Inokulation gewählt. Zudem wurden Applikationsintervalle von zwei Tagen (2dpi) und vier Tagen (4dpi) nach der Inokulation getestet, um die kurative Wirksamkeit zu bewerten.

2.1.7 Versuche zur kombinatorischen Wirkung von Ölmischungen

Um mögliche kombinatorische Wirkungen von Ölmischungen zu testen, wurden drei verschiedene Verhältnisse von Leinöl und Tungöl (LT(1), LT(2) und LT(3)) sowie eine Mischung aus allen drei Ölen (LTR) verwendet und mit den Einzelölen von Lein und Tung, den kommerziellen Produkten und einer unbehandelten Kontrolle verglichen. Details zu den Verhältnissen sind in Tabelle 9 aufgeführt. Alle Öle und kommerziellen Produkte wurden 2dbi, 1dbi und 2dpi appliziert.

2.2 Statistische Auswertung

In den Säulendiagrammen (Abbildung 24-27) sind die Daten der oben aufgeführten Versuche als Mittelwert mit zusätzlichen Standardabweichungen (+SD) dargestellt. Die Anzahl der Wiederholungen (n) ist jeweils unter den Abbildungen mit angegeben. Die Varianzanalyse (ANOVA) wurde verwendet, um die Mittelwerte der Behandlungen zu vergleichen. Bei gegebener Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test) und Homoskedastizität (Levene-Test) wurde ein Tukey-HSD-Test als Post-hoc-Verfahren zur Bestimmung homogener Untergruppen bei einem p-Wert von $p \leq 0,05$ verwendet. Daten, die nicht der Homogenität der Varianz oder der Normalverteilung entsprachen, wurden mit dem Games-Howell-Test bei einem p-Wert von $p \leq 0,05$ analysiert. Alle statistischen Analysen wurden mit der Software IBM SPSS 25.0 durchgeführt. Signifikante Unterschiede wurden dabei durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet. Konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, so wurde dies mit nicht signifikant (n.s.) kenntlich gemacht.

3 Ergebnisse

3.1 Fungizide Wirkung der Öle auf die Entwicklung von *Uromyces appendiculatus*

Die in dem folgenden Unterkapiteln (C 3.1.1–3.1.4) dargestellten Ergebnisse am Pathosystem Buschbohne und Bohnenrost (*Uromyces appendiculatus*) wurden im Januar 2021 in der Sonderausgabe „Natural Products for Plant Pest and Disease Control“ der Zeitschrift „Plants“ in englischer Form von Breiing et al. (2021) unter dem Titel „Fungicidal Efficacy of Drying Plant Oils in Green Beans against Bean Rust (*Uromyces appendiculatus*)“ veröffentlicht.

3.1.1 Dosis-Wirkungs-Beziehung

Im Rahmen eines Versuchs zur Dosis-Wirkungs-Beziehung sollte die effektivste Konzentration der Pflanzenöle ermittelt werden. Abbildung 24 zeigt die fungizide Wirkung des trocknenden Pflanzenöls L und des halbtrocknenden Pflanzenöls R gegenüber *Uromyces appendiculatus* im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle. Abgebildet ist der Krankheitsbefall von Bohnenrost auf Bohnenblättern nachdem die Pflanzenöle zwei Tage vor Inokulation (2dbi) in Konzentrationen von 0,5%, 1%, 2% und 5% appliziert wurden. Alle Ölbehandlungen unterschieden sich signifikant von der Kontrolle. Für Leinöl wurde bei allen Konzentrationen, auch bei der niedrigsten getesteten Konzentration (0,5%), eine Wirkung von 99% erreicht. Im Vergleich dazu war die Wirkung des Rapsöls geringer und reichte für alle Konzentrationen nur von 38% (0,5%) bis 62 % (2%).

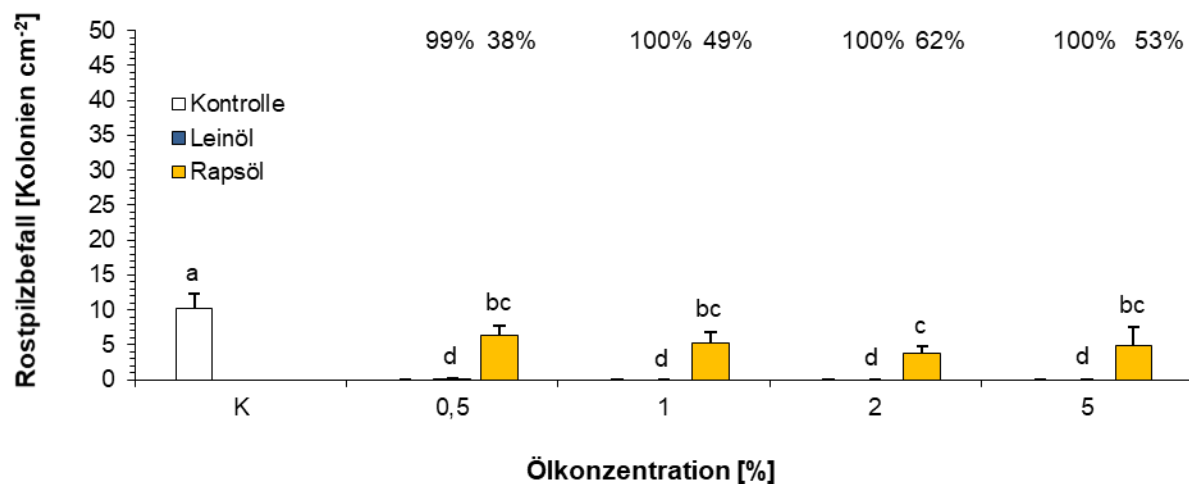


Abbildung 24: Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf Buschbohnenblättern nach einer protektiven Applikation (2dbi) von vier verschiedenen Ölkonzentrationen des trocknenden Leinöls (blau) und halbtrocknenden Rapsöls (gelb) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (weiß). Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). $n = 5$, +SD.

3.1.2 Translokation

Im Rahmen eines Translokationsversuchs wurden mögliche systemische Effekte der Pflanzenöle evaluiert. Dazu wurde jeweils nur die Hälfte der Primärblätter der Buschbohnen zwei Tage vor Inokulation behandelt, wie in Kapitel B 2.1.2 beschrieben. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse des Translokationsversuchs des trocknenden L und des halbtrocknenden R im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Die fungizide Wirkung lag auf dem behandelten Teil der Blätter für beide Öle zwischen 90% (R) und 95% (L) (Abbildung 25a). Beide Pflanzenöle unterschieden sich signifikant von der Kontrolle. Auf dem unbehandelten Teil derselben Blätter lag die Wirkung hingegen nur zwischen 4% (L) und 6% (R) (Abbildung 25b) und es gab keine signifikanten Unterschiede.

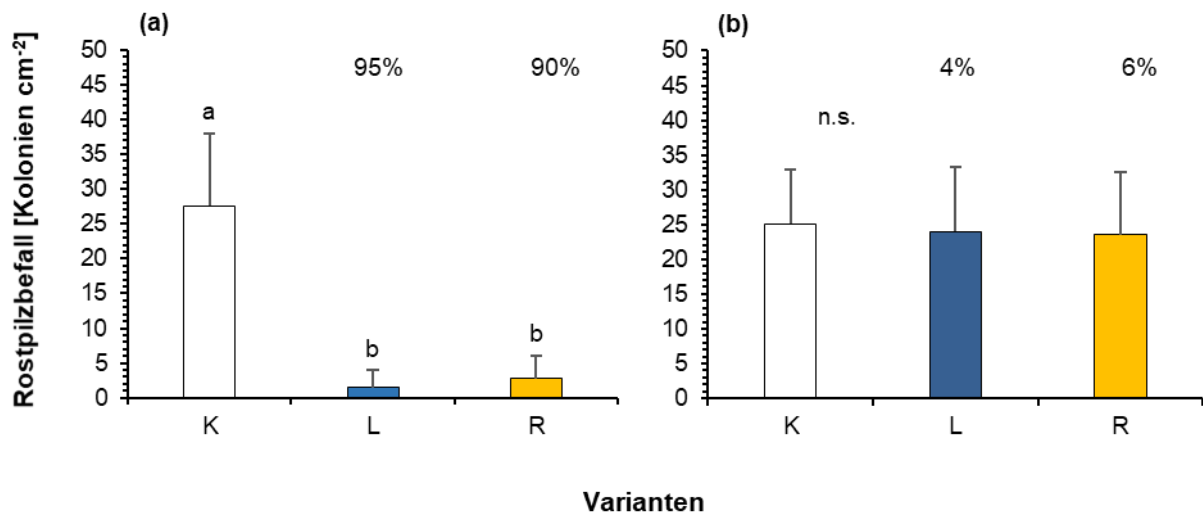


Abbildung 25: Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf **(a)** der unteren Hälfte der Primärblätter von *Phaseolus vulgaris* nach einer protektiven Behandlung (2dbi) mit dem trocknenden Leinöl (blau) und dem halbtrocknenden Rapsöl (gelb) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (weiß) und **(b)** auf der oberen unbehandelten Hälfte derselben Blätter. Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, **n.s.** = nicht signifikant. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). $n = 5$, +SD.

3.1.3 Applikationszeitpunkt

Die in vivo Versuche zur protektiven und kurativen Wirkung mit einem ausgeweiteten Zeitintervall der Applikationen wurden mehrfach unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Im Folgenden sind exemplarische Ergebnisse dargestellt, da alle Versuchswiederholungen tendenziell gleiche Ergebnisse erzielten.

In diesen weiteren Versuchsreihen wurde die protektive und kurative Wirkung der Pflanzenöle gegenüber Bohnenrost im Hinblick auf den Applikationszeitpunkt untersucht. Den optimalen Zeitpunkt für die Applikation zu kennen, ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung einer Pflanzenschutzstrategie. Aus diesem Grund wurden mehrere Zeitintervalle vor und nach der Inokulation getestet. Für die protektive Wirkung wurden die Pflanzenöle sechs, vier und zwei Tage vor der Inokulation (6dbi, 4dbi und 2dbi) untersucht. Um die kurative Wirkung zu beobachten, wurden die Pflanzenöle zwei und vier Tage nach der Inokulation (2dpi und 4dpi) eingesetzt. Im Rahmen der Versuche zur fungiziden Wirkung der Pflanzenöle gegenüber Bohnenrost kam in dieser Versuchsreihe zum Applikationszeitpunkt zum ersten Mal das trocknende Tungöl zum Einsatz. Zusätzlich zum Leinöl wurde somit ein weiteres trocknendes Pflanzenöl mit einer anderen Fettsäurezusammensetzung (Tabelle 1, Kapitel A 1.2) hinzugezogen. Es sollte die Hypothese geprüft werden, ob die fungizide Wirkung von der Art des Öls, seiner Trocknungsklasse und seiner Fettsäurezusammensetzung abhängt. Folglich wurden die einzelnen Pflanzenölpräparate (L, T, R) mit drei handelsüblichen Produkten (Cu, Mi und Fu) und einer Kontrolle verglichen. Für alle getesteten Zeitintervalle (Abbildung 26a-e) wurde dieselbe Kontrolle zum Vergleich herangezogen.

Insgesamt zeigten alle Varianten eine protektive Wirkung von 9% (Mi, 6dbi, Abbildung 26a) bis 100% (Fu, 4dbi, Abbildung 26b) und unterschieden sich bis auf Mi (6dbi, Abbildung 26a) zum jeweiligen Zeitpunkt signifikant von der Kontrolle. Während einzelnen Pflanzenöle eine protektive Wirkung (Abbildung 26a-c) von 32% (T, 6dbi, Abbildung 26a) bis 66% (T, 2dbi, Abbildung 26c) erreichten, wurde die höchste und signifikante Krankheitsreduktion für Fu beobachtet (99%-100%). Bei den trocknenden Pflanzenölen stieg die Wirksamkeit vom langen Intervall (6dbi) hin zum kurzen Intervall (2dbi). Die Wirkung des L reichte dabei von 53% bis 60% und die Wirkung des T von 32% bis 66% (Abbildung 26a und 26c). Kürzere Zeitintervalle zwischen protektiver Applikation und Inokulation mit dem Erreger führten somit zu einer höheren Wirksamkeit.

Die kurative Wirkung (Abbildung 26d und 26e) der eingesetzten Varianten war im Vergleich zur protektiven Wirkung geringer. Die höchste und zudem signifikante Krankheitsreduktion wurde für Fu mit 78% beobachtet (Abbildung 26e). Alle anderen Varianten zeigten eine kurative Wirkung zwischen -6% (Cu, 4dpi, Abbildung 26e) und 51% (L und T, 4dpi, Abbildung 26e). Die trocknenden Pflanzenöle (L und T) und Fu zeigten eine höhere kurative Wirkung 4dpi (Abbildung 26e) als 2dpi (Abbildung 26d) und führten zu einem signifikanten Unterschied im Vergleich zur Kontrolle, während R, Cu und Mi zum Zeitpunkt 4dpi (Abbildung 26e) eine weniger starke Wirkung zeigten.

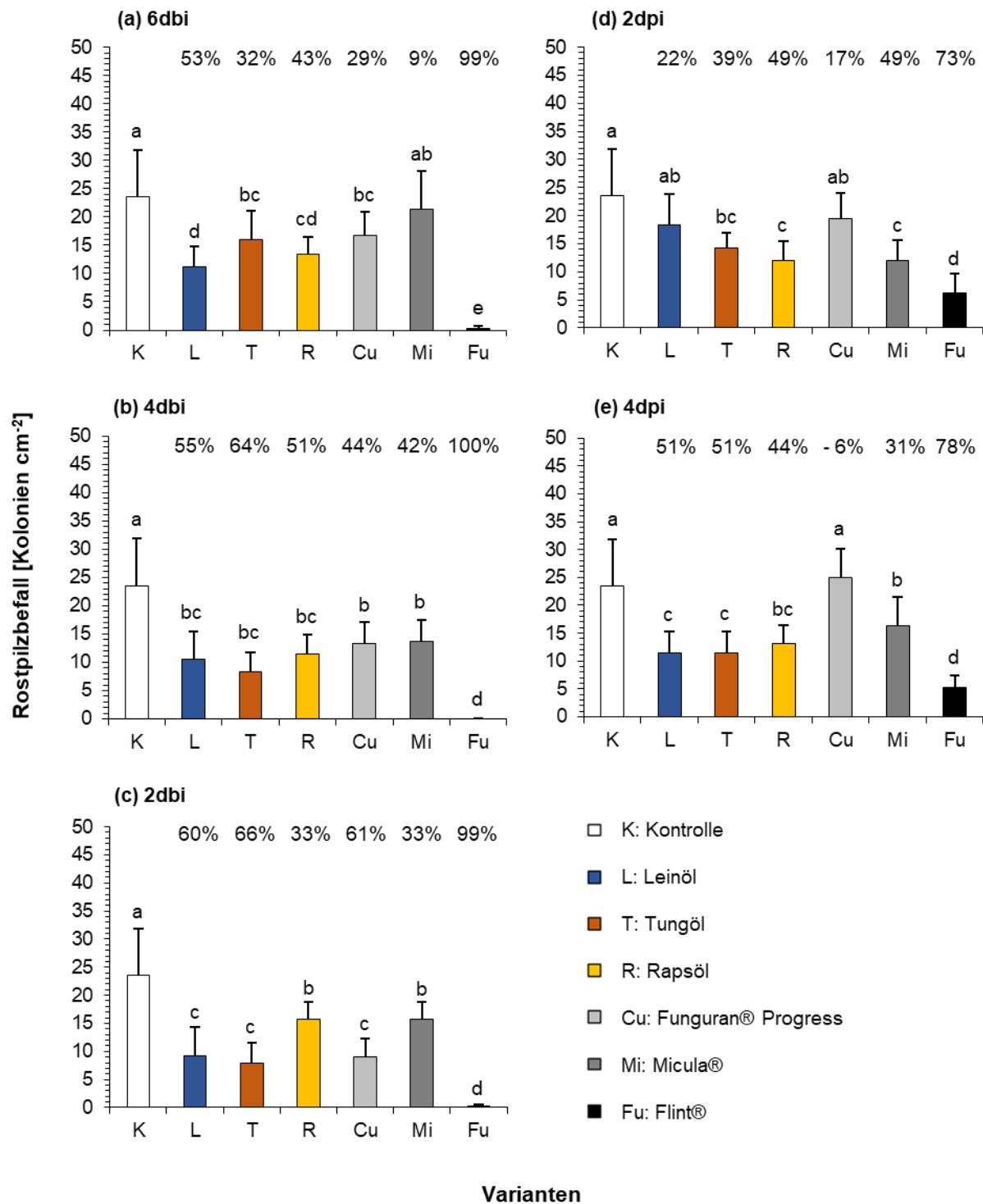


Abbildung 26: Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf Buschbohnenblätter nach **(a)** einer protektiven Applikation 6dbi, **(b)** 4dbi und **(c)** 2dbi und nach **(d)** einer kurativen Applikation 2dpi und **(e)** 4dpi von drei Pflanzenölen (L,T und R) und drei kommerziellen Produkten (Cu, Mi und Fu) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K). Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). $n = 5$, +SD.

3.1.4 Kombinatorische Wirkung von Ölmischungen

Die in vivo Versuche zur protektiven und kurativen kombinatorischen Wirkung der Öle gegenüber *Uromyces appendiculatus* wurden ebenfalls mehrfach unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Im Folgenden sind exemplarische Ergebnisse dargestellt, da alle Versuchswiederholungen tendenziell gleiche Ergebnisse erzielten.

Um mögliche kombinatorische Wirkungen von Ölmischungen zu bewerten, wurden zusätzlich zu den einzelnen Ölen vier verschiedene Mischungen (LT1, LT2, LT3 und LTR) verwendet (vgl. Tabelle 9, Kapitel B 2.1.3) und in Form von unterschiedlichen Farben dargestellt (L = Leinöl (blau), T = Tungöl (rot), R = Rapsöl (gelb)). Abbildung 27 zeigt die protektive (2dbi und 1dbi) und kurative (2dpi) fungizide Wirkung von sieben verschiedenen Pflanzenölbehandlungen im Vergleich zu kommerziellen Produkten (Cu, Mi und Fu) gegen *Uromyces appendiculatus*. Für alle getesteten Zeitintervalle (Abbildung 27a-c) wurde dieselbe Kontrolle zum Vergleich herangezogen. Alle Behandlungen zeigten eine protektive Wirksamkeit von 44% bis 100% (Abbildung 27a und 27b) und unterschieden sich signifikant von der Kontrolle. Die höchsten Effekte (99%-100%) wurden hierbei für trocknende Pflanzenöle, Kombinationen von trocknenden Pflanzenölen und Fu beobachtet. Im Vergleich zu den trocknenden Ölen zeigten R, Cu und Mi eine signifikant weniger starke Wirkung. Ein kürzeres Zeitintervall zwischen Anwendung und Inokulation von nur einem Tag (1dbi, Abbildung 27b) führte zu ähnlichen Effekten wie bei 2dbi (Abbildung 27a). Zudem erreichten die trocknenden Öle auch bei diesem Zeitintervall eine höhere Wirkung im Vergleich zum halbtrocknenden R und waren vergleichbar mit der Wirkung der Fungizidbehandlung (Fu).

Die kurative Wirkung (Abbildung 27c) der Varianten war im Vergleich zur protektiven Anwendung geringer. Kurativ erreichte Fu die signifikant höchste Krankheitsreduktion mit einem Wert von 52%. Alle anderen Varianten waren weniger effektiv mit einer Krankheitsreduktion zwischen 19% (Cu) und 28% (LTR). Es gab keine offensichtlichen Unterschiede zwischen Ölmischungen und Einzelölbehandlungen, was darauf hindeutet, dass keine Kombinationseffekte oder Wechselwirkungen vorlagen.

In dieser Versuchsreihe (Abbildung 27) wurden im Vergleich zum vorangegangenen Versuch (Abbildung 27) höhere Wirksamkeiten beobachtet, was zeigt, dass die fungizide Wirkung möglicherweise zusätzlich von Faktoren abhängt, die in der Studie nicht kontrolliert wurden (z.B. geringe Unterschiede der Umweltbedingungen, der physiologische Zustand der Pflanzen).

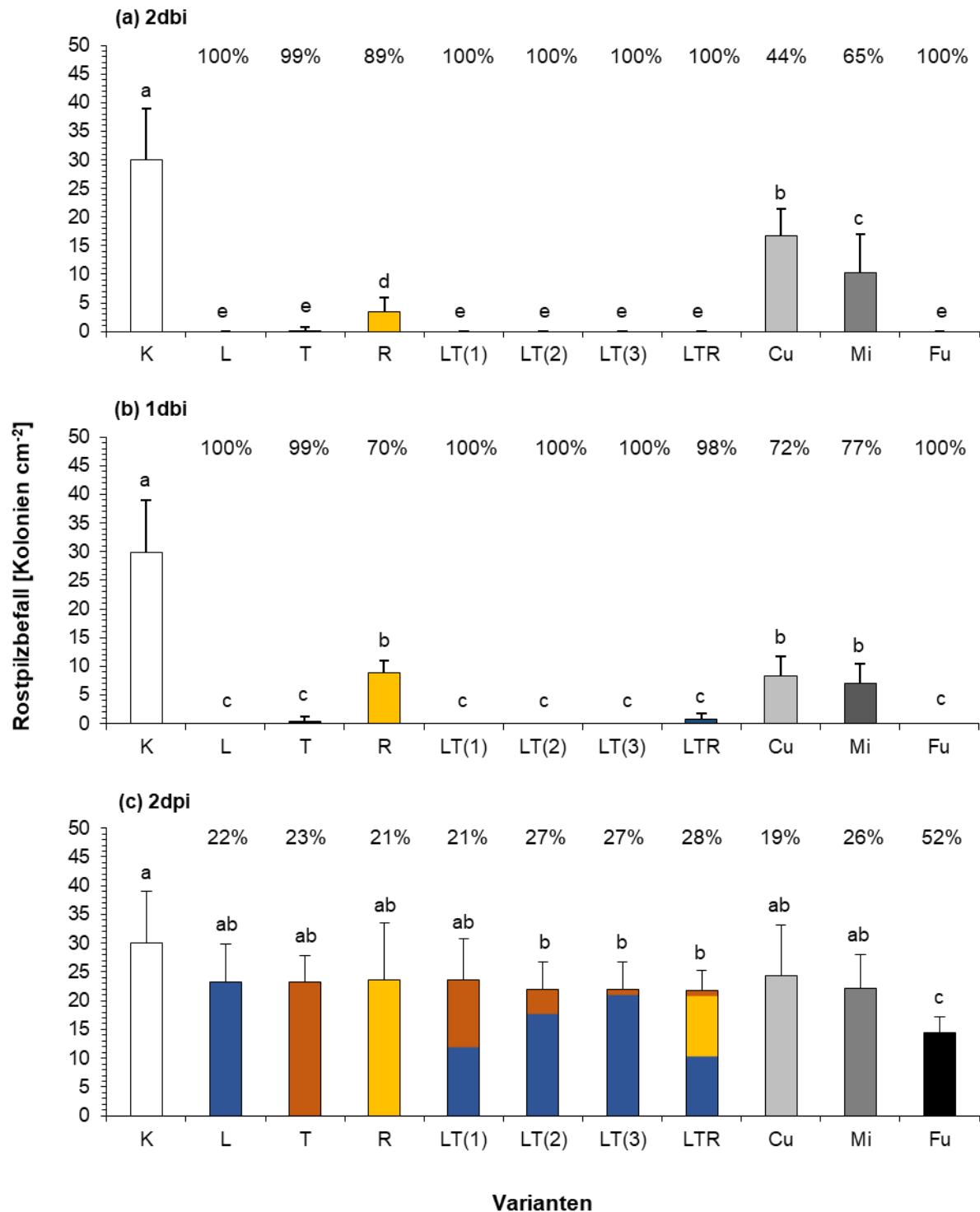


Abbildung 27: Rostpilzbefall in Kolonien pro cm² auf Buschbohnenblätter nach **(a)** einer protektiven Applikation 2dbi, **(b)** 1dbi und nach **(c)** einer kurativen Applikation 2dpi von drei Pflanzenölen (L = Leinöl (blau), T = Tungöl (rot), R = Rapsöl (gelb)), vier Ölmischungen ((LT(1), LT(2), LT(3) und LTR) (Mischungsverhältnis s. Tabelle 9) und drei kommerziellen Produkte (Cu, Mi und Fu) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K). Unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach dem Games-Howell-Test. Prozentwerte oberhalb stellen die Reduktion des Bohnenrostbefalls in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle dar (nach Abbott, 1925). $n = 5$, +SD.

4 Diskussion

Trocknenden Pflanzenölen wird seit einiger Zeit eine fungizide Wirkung gegenüber verschiedenen Pathogenen zugeschrieben (vgl. Kapitel B 1.2). Aufgrund dieser beschriebenen Erkenntnisse von Pflanzenölen gegenüber Pathogenen und der bisher bekannten Wirkung von trocknenden Pflanzenölen, ist ein Ziel dieser Arbeit eine fungizide Wirkung dieser Pflanzenöle gegenüber Pathogenen, unter kontrollierten Bedingungen, zu zeigen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass durch den Einsatz trocknender Pflanzenöle der Befall von Pathogenen reduziert werden kann. Zudem wurden die Hypothesen formuliert, dass die Wirkung der trocknenden Pflanzenöle vom Zeitpunkt der Applikation abhängt, es einen Unterschied der fungiziden Wirkung zwischen trocknenden, halbtrocknenden bzw. nicht-trocknenden Pflanzenölen gibt und diese fungizide Wirkung von der Art des Öls, seiner Trocknungsklasse und Fettsäurezusammensetzung abhängt.

In den hier dargestellten Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Konzentration von 2% der Pflanzenöle (L, T und R) in mehreren Untersuchungen zu einer signifikanten Kontrolle des Bohnenrostes führte. Die eingesetzten trocknenden Öle (L, T) waren dabei wirksamer als das halbtrocknende Öl (R). Darüber hinaus zeigten Ölmischungen keine positivere Wirkung als einzeln eingesetzte Öle (Abbildung 27). Eine protektive Anwendung der Pflanzenöle (bis zu 6dbi; Abbildung 26 & 27) führte zu einer höheren Wirksamkeit als eine kurative Anwendung der selben Varianten. Zudem konnte keine systemische Wirkung der eingesetzten trocknenden und halbtrocknenden Pflanzenöle festgestellt werden (Abbildung 25).

Die fungizide Wirkung von glyceridischen Pflanzenölen auf Pilzkrankheiten wie den Echten Mehltau des Hopfens (Martin & Salmon, 1933) oder den Blauschimmel des Tabaks (Clayton et al., 1943) ist bereits bekannt. Auch Ah Chee et al. (2018) zeigten bereits, dass beispielsweise durch den Einsatz von Sojaöl der Echte Mehltau (*Sphaerotheca fuliginea*) an Kürbisgewächsen kontrolliert werden kann. Dennoch ist die Verwendung von Pflanzenölen in der landwirtschaftlichen Praxis begrenzt. Ein Grund für die begrenzte Verwendung liegt u.a. darin, dass die bisher eingesetzten Ölpräparate zu Verstopfungen in den Spritzdüsen führen können (Brendel, 2013), was auf eine hohe Viskosität von Ölen zurückzuführen ist (Kersting, 1969).

Insgesamt konnte durch die Ergebnisse in Kapitel B 3 gezeigt werden, dass eine protektive Anwendung des trocknenden Leinöls (L) und des Tungöls (T) im Zeitraum von zwei bis sechs Tagen vor der Inokulation zu einer wirksamen Bekämpfung des Bohnenrostes führte. Diese Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen von Arslan (2014), wenngleich in diesen Versuchsreihen ein kürzeres Zeitintervall (zwei Stunden vor der Inokulation) verwendet wurde. Diese Erkenntnisse unterstützen dennoch die in Abbildung 27 dargestellten Ergebnisse. Der Bohnenrostbefall konnte durch eine zweiprozentige, protektiv applizierte Leinöl-in-Wasser-Emulsion (2dbi) um bis zu 100% reduziert werden (Abbildung 27). Clayton et al. (1943)

konnten ebenfalls eine fungizide Wirkung von Leinöl und Tungöl gegen Blauschimmel an Tabakpflanzen zeigen. Sie applizierten verschiedene Pflanzenöle mehrmals in Konzentrationen von 1% und 2%. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass die effektivsten Ergebnisse mit 2% Lein- oder Tungöl erzielt werden konnten und führten diese Ergebnisse auf die hohen Gehalte an Linolensäure bzw. α -Elaeostearinsäure in den jeweiligen Pflanzenölen zurück (vgl. Tabelle 1, Kapitel A 1.2).

Im Gegensatz zu den hier dargestellten Ergebnissen zeigte Arslan (2014), dass eine kurative Behandlung mit Leinöl gegen *Uromyces appendiculatus* unwirksam war, wenn die Behandlung 24 Stunden nach der Inokulation erfolgte. In den hier dargestellten Versuchen konnte hingegen gezeigt werden, dass eine kurative Wirkung gegenüber Bohnenrost bis zu vier Tage nach der Inokulation erreicht werden konnte (Abbildung 26). Die unterschiedlichen Wirksamkeiten in den zitierten Studien im Vergleich zu den hier dargestellten Ergebnissen können auf mögliche unterschiedliche Herstellungsprozesse der verwendeten Öle zurückzuführen sein. Bisherige Ergebnisse zeigen, wie bedeutend die Herstellung und Formulierung von trocknenden Pflanzenölen für ihre Wirksamkeit gegen Krankheitserreger und Schädlinge ist. Von dieser Erkenntnis berichten auch bereits Ah Chee et al. (2018). Unter anderem sollten die Ölprodukte mit einem Emulgator versetzt werden, um eine gleichmäßige Verteilung bzw. Suspension der einzelnen Partikel zu ermöglichen (Wurms & Ah Chee, 2018). Wurms und Ah Chee (2018) erwähnten darüber hinaus, dass beispielsweise in der Herstellung ihrer Öle zusätzlich Antioxidationsmittel zum Einsatz kommen, um zu verhindern, dass die hergestellten Ölprodukte ranzig werden. Auch bei den in dieser Arbeit verwendeten Pflanzenölen kamen, wie in Kapitel B 2.1.2 bereits beschrieben, Emulgatoren zum Einsatz, um entsprechende Öl-in-Wasser-Emulsionen herzustellen. Zudem kommt es auf die generelle Konzentration aller Bestandteile der Ölprodukte an, da diese einen möglichen Einfluss auf die Pflanzengesundheit und die Emulsionsstabilität haben können (Wurms & Ah Chee, 2018; Ah Chee et al., 2018). Jedoch wird nicht in allen Studien der konkrete Herstellungsprozess der eingesetzten Öle beschrieben. Es sollte zudem berücksichtigt werden, dass die Wirksamkeit auch in Abhängigkeit von weiteren Faktoren des Versuchs, die nicht vollständig kontrolliert werden können (z.B. die Kultivierung (Umweltbedingungen), die Virulenz des Erregers oder der physiologische Zustand der Pflanzen), variieren kann (Abbildungen 26 und 27).

Northover und Timmer (2002) berichteten darüber hinaus, dass sogenannte „Horticultural Mineral Oils“ und glyceridische Pflanzenöle nur eine kurze protektive Wirkung von bis zu drei Tagen haben. Diese Erkenntnis konnte teilweise durch die hier dargestellten Ergebnisse bestätigt werden. Es konnte gezeigt werden, dass kürzere Intervalle zwischen protektiver Behandlung und dem Zeitpunkt der Inokulation zu einer höheren Wirksamkeit führten (Abbildung 26). Es sollte jedoch auch in diesen Fällen berücksichtigt werden, dass eine

Wirksamkeit, wie bereits erwähnt, durch den Einfluss weiterer Faktoren in einem Versuch, variieren kann.

Trocknende Öle zeichnen sich durch ihren hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren aus (Meier et al., 2007; Roth & Kormann, 2005), die für die Filmbildung (Yang et al., 2015) auf Oberflächen durch schnelle autoxidative Trocknung durch den Kontakt mit Sauerstoff verantwortlich sind (Derksen et al., 1995; Oyman et al., 2005; Soucek et al., 2012). Diese Eigenschaften der trocknenden Pflanzenöle unterstützen die vorgestellten Ergebnisse, sollten aber durch detaillierte mikroskopische Studien weiter untersucht werden. Der Trocknungseffekt und die daraus resultierende Filmbildung auf Pflanzenoberflächen können womöglich die Infektion und das Wachstum von pilzlichen Erregern beeinträchtigen, indem sie z.B. Infektionsherde verdecken, eine zusätzliche Barriere bilden oder die Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Pathogen beeinträchtigen. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse von Chen und Ko (2015) gestützt, die feststellten, dass Leinöl die Keimschlauchlänge von Erdnussrost reduziert und die Appressorienbildung unterdrückt. Mendgen (1978) wies für *Uromyces phaseoli* (syn.: *U. appendiculatus*) zudem nach, dass die Infektion nur dann erfolgreich ist, wenn sich der Keimschlauch in ein Appressorium ausdifferenziert. Außerdem ist bekannt, dass Tungöl eine gelatineartige Konsistenz haben kann und aufgrund dieser Eigenschaft bei der Herstellung von wasserfestem Gewebe und Papier verwendet wird (Roth & Kormann, 2005). Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Wirksamkeit trocknender Öle gegen Krankheitserreger zum Teil durch ihre filmbildende Eigenschaft erklärt werden kann, die eine Schicht auf der Pflanzenoberfläche als zusätzliche physikalische und chemische Barriere bildet, die den Infektionsprozess beeinträchtigt. Ob es sich dabei um eine fungistatische (Northover & Schneider, 1996) oder eine fungizide Wirkung (Martin & Salmon, 1933) handelt, kann nicht eindeutig beantwortet werden und bleibt Gegenstand von weiteren Diskussionen.

Insgesamt konnte jedoch im Rahmen der Pathogenversuche gezeigt werden, dass Leinöl und Tungöl eine protektive Wirkung gegen Bohnenrost erzielen können, wenn sie zwei oder vier Tage vor der Inokulation angewendet werden. Diese Wirksamkeit nimmt bei einem längeren Zeitintervall, bei einer Applikation sechs Tage vor Inokulation, ab. Zudem konnte eine kurative Wirkung bei einer Applikation von bis zu vier Tagen nach Inokulation ebenfalls nachgewiesen werden.

5 Fazit

Aufgrund der beschriebenen Filmbildung (Kapitel B 1.2) und der bisher bekannten Wirkung von trocknenden Pflanzenölen wurden die Hypothesen aufgestellt, dass durch den Einsatz trocknender Pflanzenöle ein pilzlicher Befall reduziert werden kann (**H1**) und, dass diese Wirkung gegenüber Pathogenen vom Applikationszeitpunkt der Öle (**H2**) abhängt. Darüber hinaus wurde vermutet, dass sich die fungizide Wirkung trocknender Pflanzenöle gegenüber der Wirkung halbtrocknender bzw. nicht-trocknender Pflanzenöle unterscheidet und die fungizide Wirkung somit von der Art des Öls, seiner Trocknungsklasse und Fettsäurezusammensetzung abhängt (**H3**).

Die in Kapitel B 3 dargestellten Ergebnisse geben vor allem Aufschluss über die Wirksamkeit der zwei trocknenden Pflanzenöle Leinöl und Tungöl gegenüber dem Erregern *Uromyces appendiculatus*.

Insgesamt konnte im Rahmen der Pathogenversuche gezeigt werden, dass Leinöl und Tungöl eine protektive Wirkung gegen Bohnenrost erzielen können, wenn sie zwei oder vier Tage vor der Inokulation angewendet werden. Diese Wirksamkeit nimmt bei einem längeren Zeitintervall ab. Zudem konnte eine kurative Wirkung bei einer Applikation von bis zu vier Tagen nach Inokulation nachgewiesen werden.

Demzufolge kann zusammengefasst werden, dass durch den Einsatz trocknender Pflanzenölen ein pilzlicher Befall reduziert werden kann und diese Wirkung vom Applikationszeitpunkt abhängig ist. Auch die Hypothese, dass die fungizide Wirkung von der Art des Öls, der Trocknungsklasse und der Fettsäurezusammensetzung abhängt, konnte bestätigt werden.

Die Wirksamkeit lässt sich zum Teil durch die Eigenschaft der Filmbildung der trocknenden Pflanzenöle erklären. Denn ein dünner Film auf der Pflanzenoberfläche stellt eine zusätzliche Barriere gegen eindringende Hyphen von Pathogenen dar, wodurch Wirt-Parasit-Interaktionen beeinträchtigt werden können. Auf diese Weise konnte in den hier dargestellten Ergebnissen vor allem eine protektive, aber auch eine kurative fungizide Wirkung erzielt werden.

Die hier dargestellten Ergebnisse unterstreichen ebenfalls das Potenzial von trocknenden Pflanzenölen als nicht-toxische und umweltfreundliche „Biorationals“ für den ökologischen Landbau.

C Insektizide Wirkung trocknender Pflanzenöle

1 Einleitung

Die Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.) zählt in Deutschland mit zu den am häufigsten angebauten Kulturpflanzenarten. Mit einer Anbaufläche von 258.300 ha im Jahre 2021 nahm sie neben Getreide (6.053.000 ha), Silomais (2.219.600 ha), Raps (1.000.900 ha) und Zuckerrüben (390.700 ha) einen hohen Stellenwert in der landwirtschaftlichen Produktion in Deutschland ein (Statistisches Bundesamt, 2022). Als bedeutendster Schädling an Kartoffeln ist der Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* Say) bekannt. Seine Fraßschäden können zu erheblichen Ertragseinbußen führen. Ohne eine Bekämpfung der Kartoffelkäfer können sie eine Kultur vollständig zerstören (Alyokhin et al., 2008). Auch Tomaten, Auberginen und andere Nachtschattengewächse können befallen werden. Nachdem sich der Kartoffelkäfer von Amerika aus erstmals in Europa etabliert hatte, ist er heute in 21 EU-Mitgliedstaaten verbreitet (EFSA et al., 2020). Zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers stehen derzeit unterschiedliche nicht-chemische und chemische Maßnahmen zur Verfügung (Hale et al., 2009). Am häufigsten kommt es hierbei zum Einsatz von Insektiziden (Alyokhin et al., 2008). Neben beißend-kauenden Schädlingen, wie dem Kartoffelkäfer, spielen auch stechend-saugende Schädlinge, wie die Schwarze Bohnenblattlaus (*Aphis fabae* Scopoli L.), heute in vielen Kulturen, u.a. der Ackerbohne (*Vicia faba* L.), eine wichtige wirtschaftliche Rolle (Hallmann et al., 2009). Dabei stechen sie das Phloem der Pflanzen an und entnehmen wichtige Nährstoffe oder übertragen Viren (Vandenborre et al., 2009). Zusätzlich stellt der ausgeschiedene Honigtau, als Nährmedium für Pilze, eine Gefahr für die Ertragssicherheit dar (Hallmann et al., 2009). In der konventionellen Landwirtschaft werden diese Schadorganismen in der Regel durch hochwirksame synthetische Insektizide bekämpft. In den letzten Jahren zeigte sich jedoch eine vermehrte Resistenz der Schadorganismen gegenüber diesen Insektiziden (Raßmann, 1973).

Wie bereits in Kapitel A 1 und B 1 erläutert, führt ein übermäßiger Einsatz von Pflanzenschutzmitteln auch zu unterschiedlichen Umweltproblemen. Gründe dafür sind die bereits beschriebene hohe Toxizität, die nicht biologisch abbaubaren Eigenschaften der Produkte und die Rückstände der Pflanzenschutzmittel im Boden, im Wasser und in den Pflanzen. Daher müssen auch im Bereich der Insektizide neue, hochselektive und biologisch abbaubare Alternativen gefunden werden, um die Probleme einer Langzeittoxizität zu lösen. Zudem müssen umweltfreundliche Produkte untersucht und Techniken entwickelt werden, mit denen der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Allgemeinen, bei gleichbleibenden Erträgen, verringert werden kann. Natürliche Produkte sind eine relevante Alternative zu synthetischen Pflanzenschutzmitteln, um die negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren (Koul et al., 2008).

Im biologischen Anbau sind Produkte dieser Art derzeit kaum zugelassen. So findet zum Beispiel die biologische Blattlausbekämpfung oder Kontrolle von Kartoffelkäfern unter anderem durch den Einsatz von Nützlingen (Börner, 2009), Prädatoren (Hilbeck et al., 1997; Patterson & Ramirez, 2016) oder Parasitoiden (Sablon et al., 2013; Patterson & Ramirez, 2016) statt. Gleichzeitig sind wenige Pflanzenschutzmittel auf Pflanzenbasis, wie Niemöl oder Pyrethrum, mit unterschiedlich starkem Erfolg im Einsatz (Kühne et al., 2006). Um das begrenzte Angebot an Bekämpfungsmöglichkeiten in der ökologischen Landwirtschaft auszuweiten, sollte daher nach neuen Lösungswegen gesucht werden. Auch Rapsöl, ein bereits zugelassenes Pflanzenschutzmittel, bildet einen guten Ausgangspunkt für weitere Forschung. Seine Wirkung beruht überwiegend auf einem dünnen Ölfilm, der die Insekten überzieht und diese erstickt (Roth & Kormann, 2000). Mit Blick auf die Zukunft bieten diese Alternativen und weitere glyceridische Pflanzenöle ebenfalls Potenzial für den Einsatz im integrierten oder ökologischen Pflanzenschutz. Um die Potenziale des Einsatzes von Pflanzenölen einordnen zu können, ist es hilfreich, sich zunächst mit wichtigen Schädlingen und deren derzeitigen Bekämpfungsmethoden auseinanderzusetzen.

1.1 Vorkommen und Biologie von *Leptinotarsa decemlineata*

Der Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* Say) wurde im Jahre 1811 von Thomas Nuttall entdeckt und 1824 erstmalig von Thomas Say anhand von Exemplaren, die von Büffelkletten (*Solanum rostratum* Dunal) gesammelt wurden, beschrieben (Jacques & Fasulo, 2015). Casagrande (1987) fasste zusammen, dass Kartoffelkäfer nach ihrer Entdeckung an unterschiedlichen Pflanzenarten der Familie der Nachtschattengewächse (Solanaceae) vorzufinden waren. 1874 wurden die ersten großen Schäden durch Kartoffelkäfer an Kartoffelpflanzen von Riley (1875) dokumentiert. Von Amerika aus wurde der Kartoffelkäfer 1877 nach Europa eingeschleppt und verursachte auch dort großen Schaden (Meyhöfer & Poehling, 2013; Kühne et al., 2006).

Der Kartoffelkäfer gehört systematisch zum Stamm der Gliederfüßer (Arthropoda) und darunter zur Klasse der Insekten (Insecta). Zudem ist er zugehörig zur Ordnung der Käfer (Coleoptera) und kann der Familie der Blattkäfer (Chrysomelidae) bzw. der Unterfamilie der Blattkäfer (Chrysomelinae) zugeordnet werden (Börner, 2009). Das Außenskelett von Käfern besteht aus einem Chitinpanzer, der sich in die drei Bereiche Kopf, Halsschild und Hinterleib aufteilen lässt. Sie besitzen zwei Flügelpaare, von denen das erste Flügelpaar zu Deckflügeln umgebildet ist und den Hinterleib bedeckt. Darunter befindet sich das zweite Flügelpaar, die Hinterflügel, und das Abdomen der Käfer. Beides wird von den Deckflügeln geschützt (Börner, 2009; Hallmann et al., 2009). Der Körper eines adulten Kartoffelkäfers ist 10 mm lang, gelblich-orange und auf den Flügeln befinden sich insgesamt zehn schwarze Streifen. Die Larven sind

hingegen 15 mm lang, haben weiche Körper, sind rötlich und haben auf jeder Seite schwarze Flecken. Die Eier sind leuchtend orange (Börner, 2009; Hale et al., 2009).

Der Lebenszyklus eines Kartoffelkäfers beginnt mit der Überwinterung der adulten Käfer im Boden (Hale et al., 2009; Hallmann et al., 2009). Mit steigender Temperatur im Frühling werden sie aktiv (Hale et al., 2009). Beim Auflaufen der Kartoffeln verlassen die Imagines den Boden, sie beginnen zu fressen, sich zu paaren und legen dann ihre leuchtend orangen Eier, meist in Gruppen von 10-40 Eiern, auf der Blattunterseite von Kartoffelpflanzen ab (Börner, 2009; Hale et al., 2009). Jeder weibliche Käfer kann im Laufe seines Lebens über 300 Eier legen (Hale et al., 2009). Nach 4-9 Tagen schlüpfen die Larven und ernähren sich sofort von Blättern (Börner, 2009; Hale et al., 2009). Die Larven durchlaufen vier Larvenstadien und sind nach 2-3 Wochen ausgewachsen (Hale et al., 2009). Nachdem die Larven ausgewachsen sind, graben sie sich flach in den Boden ein, um sich zu verpuppen. Das Stadium der Verpuppung dauert 5-10 Tage. Die Imagines schlüpfen und es kommt zum erneuten Blattfraß. Es folgt ein neuer Entwicklungszyklus der Kartoffelkäfer, sodass es pro Jahr 2-3 Generationen gibt (Börner, 2009; Hale et al., 2009). Die Larven der ersten Generation erscheinen von Mai bis Juni und die zweite Generation im Juli bis August (Hale et al., 2009). Anschließend, ab September, folgt die Abwanderung der Kartoffelkäfer in den Boden, um zu überwintern (Börner, 2009). Die Überwinterung erfolgt in 20-50 cm Bodentiefe (Kühne et al., 2006).

Sowohl adulte Käfer als auch die Larven besitzen beißend-kauende Mundwerkzeuge und ernähren sich phytophag (Börner, 2009; Hallmann et al., 2009). Käfer und Larven verursachen zu Beginn einen Rand- und Lochfraß an den Blättern (Hallmann et al., 2009) bis hin zum typischen Schadbild, dem Skelettierfraß. Hierbei wird das Interkostalgewebe zerstört und die Blattleitbündel bleiben stehen (Börner, 2009). Bei einem Massenaufreten von Kartoffelkäfern kann es bis zu einem Kahlfraß kommen (Hallmann et al., 2009; Meyhöfer & Poehling, 2013). Die Nahrungsaufnahme der Adulten und Larven findet kontinuierlich statt. Allerdings stellen die Larven ihre Nahrungsaufnahme ein, wenn sie sich häuten (Hale et al., 2009). Hsiao und Fraenkel (1968) beobachteten in ihren Untersuchungen, dass der Kartoffelkäfer, als spezialisierter Pflanzenfresser von Pflanzen der Familie der Nachtschattengewächse (Solanaceae), bei Fütterungsversuchen mit über 100 Pflanzenarten die Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.) bevorzugte.

1.1.1 Bekämpfungsmaßnahmen gegen Kartoffelkäfer

Die Lebensweise des Kartoffelkäfers ist sehr vielseitig, was ihn zu einem anspruchsvoll zu bekämpfenden Schädling macht. Er verteilt seine Nachkommen sowohl räumlich, innerhalb und zwischen Feldern, als auch zeitlich zwischen den Jahren (Solbreck, 1978; Voss & Ferro, 1990), wodurch es sich um einen Schädling handelt, für den vielseitige Bekämpfungsmaßnahmen notwendig sind. Für die Bekämpfung des Kartoffelkäfers stehen

unterschiedliche nicht-chemische und chemische Maßnahmen zur Verfügung (Hale et al., 2009).

Chemische Maßnahmen

Die am häufigsten angewandte Bekämpfungsmaßnahme ist der Einsatz von Insektiziden (Alyokhin et al., 2008). Dazu zählen synthetische Insektizide mit den Wirkstoffen Chlorantraniliprol (Jiang et al., 2012), Metaflumizon (Hitchner et al., 2012), Lambda-Cyhalothrin, Imidacloprid und Thiamethoxam (Ropek & Kołodziejczyk, 2019). Neonikotinoide Wirkstoffe, wie Imidacloprid und Thiamethoxam, sind systemische Pflanzenschutzmittel, die im Gegensatz zu Kontaktpestiziden, welche auf der Oberfläche der behandelten Pflanzenteile (z.B. Blätter) verbleiben, von der Pflanze aufgenommen und durch die gesamte Pflanze (Blätter, Blüten, Wurzeln und Stängel sowie Pollen und Nektar) transportiert werden. Sie sind für wirbellose Tiere, wie Insekten, giftig und beeinflussen das zentrale Nervensystem, was zur Lähmung und zum Tod führt. Im Jahr 2013 wurden neonikotine Wirkstoffe als Insektizide zugelassen. Hierbei handelt es sich um Mittel wie z.B. Clothianidin, Imidacloprid, Thiamethoxam, Acetamiprid und Thiacloprid. Doch vor allem im Hinblick auf die Bienengesundheit und deren Schutz erstellte die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (European Food Safety Authority = EFSA) eine Risikobewertung, woraufhin der Einsatz dieser Wirkstoffe noch im selben Jahr wieder eingeschränkt wurde. Seit 2018 ist laut Durchführungsverordnungen der Kommission zur Änderung der Zulassungsbedingungen für die Wirkstoffe Imidacloprid, Clothianidin und Thiamethoxam eine Anwendung im Freien verboten (EU Kommission, 2020).

Darüber hinaus führt eine häufige Anwendung von Insektiziden zu einer raschen Entwicklung von Resistenzen der Käfer gegenüber vielen Wirkstoffen, die in den meisten Insektiziden enthalten sind. Das Resistenzniveau variiert allerdings stark zwischen unterschiedlichen Populationen und Lebensstadien der Kartoffelkäfer. Aus diesem Grund werden verschiedene Klassen von Insektiziden mit unterschiedlichen Wirkstoffen im Wechsel eingesetzt, um die Entwicklung von Resistenzen zu verzögern (Alyokhin et al., 2008). Bei der Durchführung der chemischen Behandlung wird außerdem die größte Wirksamkeit erzielt, wenn die Larven der Kartoffelkäfer noch klein sind (Hale et al., 2009).

Physikalische Maßnahmen

Neben dem Einsatz von Insektiziden erweisen sich auch kulturspezifische Veränderungen als effektive Strategien zur Kartoffelkäferbekämpfung (Sablon et al., 2013). Bereits 1984 fassten Lashomb und Ng zusammen, dass sich die Eiablage und das Auftreten von Larven auf Feldern mit wechselnder Fruchtfolge verzögert. Zudem ergänzten Weisz et al. (1994), dass der Zeitpunkt der Besiedelung adulter Käfer und die Populationsdichte mit einer passenden

Fruchtfolge, die z.B. Winterweizen enthält, und einer räumlichen Distanz zu Kartoffelfeldern aus dem Vorjahr verzögert werden konnte. Neben der Distanz sollte zudem darauf geachtet werden, dass die neu angepflanzte Kultur nicht der Familie der Nachtschattengewächse (Solanaceae) angehört (Casagrande, 1987). Somit ist eine geeignete Fruchtfolge bereits seit Jahren eine effektive Strategie gegen überwinterte Kartoffelkäfer. Auch das Vernichten von Ernterückständen erweist sich als geeignete Maßnahme sowie ein früher bzw. später Pflanztermin, um zu vermeiden, dass ein Befall in einer für den Pflanzenertrag kritischen Phase stattfindet (Hale et al., 2009, Kühne et al., 2006).

Für Landwirte, für die eine weite Fruchtfolge oder späte Pflanzung keine praktikable Option bietet, wurden alternative Strategien untersucht (Weber et al., 1994). Hierfür wurden in unterschiedlichen Studien sogenannte „Push-Pull-“ und „Trap-Crop-“ Strategien erforscht, um sich ein Bild der Besiedelung und Ausbreitung überwinteter adulter Kartoffelkäfer zu verschaffen (Gabryś & Kordan, 2013). Push-Pull-Strategie bedeutet, dass Schädlinge von einer Pflanze abgehalten oder abgeschreckt (Push) und gleichzeitig in andere Bereiche, beispielsweise durch Fallenkulturen (Trap Crops) oder Grenzkulturen, gelockt (Pull) werden. Die Push-Pull-Strategie beinhaltet die Manipulation von Schadinsekten durch die Integration von Reizen, die die zu schützende Ressource für die Schädlinge unattraktiv erscheinen lassen (Push) und sie gleichzeitig zu einer attraktiven Quelle locken (Pull), von der die Schädlinge anschließend entfernt werden können (Cook et al., 2007).

Weber et al. (1994) und Hoy et al. (2000) führten weitere Versuche zur Trap Crop-Strategie, den sogenannten Fallenkulturen, durch. Hoy et al. (2000) untersuchten die Wirksamkeit von Fallenkulturen im Frühjahr. Hierbei ging es um Wirtspflanzen, die zwischen dem Überwinterungsort und einem neuen Kartoffelfeld platziert wurden, um die überwinterten adulten Käfer zurückzuhalten, sie zu konzentrieren und sie vom Feld fernzuhalten. Dieses physikalische Verfahren, eine Barriere in Form einer dichten Zwischenpflanzung mit Roggen, hatte einen höheren Einfluss auf die Bewegung der Kartoffelkäfer als eine chemische Barriere. Denn der Einsatz von chemischen Behandlungen der Randreihen reduzierte hingegen die Anzahl der Käfer nur in und kurz hinter diesen behandelten Bereichen, sodass die Auswirkungen nur lokal waren und keine signifikante Reduktion der Käfer im Kartoffelfeld beobachtet werden konnte (Hoy et al., 2000).

Wenn die Käfer im Frühling auftauchen, sind diese nicht weit verteilt und suchen ihre Wirtspflanzen zunächst laufend auf, obwohl sie fähig sind zu fliegen (Capinera, 2001). Da sie sich zunächst laufend verbreiten, haben Untersuchungen von Feldern, die mit Kunststoff ausgelegten Gräben umgeben waren, gezeigt, dass dadurch die Population der überwinterten adulten Käfer um fast 50% reduziert werden konnte (Boiteau et al., 1994). Misener et al. (1993) haben darüber hinaus im Rahmen ihrer Versuche V-förmige Gräben mit Kunststoff ausgelegt. Mit diesem Versuchsaufbau konnten sogar 95% der Kartoffelkäfer zurückgehalten werden.

Zehnder und Hough-Goldstein (1989) zeigten zudem, dass durch eine andere Barriere, in Form von ausgelegtem Strohmulch im Kartoffelfeld, die Kartoffelkäferpopulationen signifikant reduziert werden konnte.

Eine weitere Strategie als effektive Maßnahme zur Kartoffelkäferbekämpfung ist die richtige Auswahl der Sorte. Denn Sorten mit viel Blattmaterial tolerieren mehr Schäden als Sorten mit weniger Blattmaterial. Auch wird durch den Einsatz von frühen Sorten die Nahrungsquelle für den Kartoffelkäfer in späteren Monaten verringert (Hale et al., 2009). Neben dem manuellen Einsammeln gibt es auch die Möglichkeit einer mechanischen Kontrolle mittels Vakuumsauger oder ähnlichen Geräten, um die Schädlinge zu entfernen (Hale et al., 2009; Hoy et al., 2000). Diese Sauggeräte können als Anbaugeräte am Schlepper angebracht werden und Larven und adulte Käfer entfernen (Kühne et al., 2006).

Molekular- & Biologische Maßnahmen

Neben den bisher aufgezählten Maßnahmen spielt auch die biologische Kontrolle gegenüber Kartoffelkäfern eine Rolle. Dazu zählt z.B. der Einsatz von Nützlingen (Börner, 2009), Prädatoren (Hilbeck et al., 1997), Parasitoiden, Nematoden oder Pilzen (Sablon et al., 2013). Bereits 1993 diskutierten Hough-Goldstein et al. den Einsatz von unterschiedlichen natürlichen Gegenspielern wie Milben, Spinnen und Insekten als biologische Kontrollmaßnahmen gegen den Kartoffelkäfer. Untersucht wurden Florfliegen (Neuroptera: Chrysopidae), räuberische Stinkwanzen (Hemiptera: Pentatomidae, Unterfamilie Asopinae), Raupenfliegen (Diptera: Tachinidae), verschiedene Käfer (Coleoptera: Coccinellidae, Cicindelidae, Staphylinidae und Carabidae) sowie parasitäre und räuberische Hautflügler (Hymenoptera). Sie stellten heraus, dass eine vermehrte Ausbringung von Arten, die eine große Anzahl an Eiern des Kartoffelkäfers zerstören, wie *Perillus bioculatus* oder *Podisus maculiventris*, eine wirkungsvolle Bekämpfung bieten könnte. Besonders, wenn sie im Rahmen eines integrierten Schädlingsbekämpfungsprogramms zu Beginn der Saison, wenn die Bekämpfung die größte Dringlichkeit erfordert, eingesetzt werden (Hough-Goldstein et al., 1993).

Doch obwohl bereits viele natürliche Feinde des Kartoffelkäfers identifiziert wurden, sind sie in der Regel nicht in der Lage, die Populationen unter das notwendige Maß zu regulieren (Capinera, 2001). Denn eine sehr hohe Fekundität des Kartoffelkäfers führt oft dazu, dass die Population den wirtschaftlichen Schwellenwert überschreitet, bevor sie von ihren natürlichen Feinden eingedämmt werden kann (Hough-Goldstein et al., 1993). Auch Hilbeck et al. (1997) stellten bei ihren Untersuchungen fest, dass der Einsatz von Prädatoren an Kartoffelkäfereiern eine Reduktion dieser hervorrufen konnte. Sie fügten allerdings auch hinzu, dass diese Maßnahme, um die Kartoffelkäferpopulation gezielt zu reduzieren, mit einem gleichzeitigen Rückgang der natürlichen Feinde einhergeht (Hilbeck et al., 1997), weshalb diese Maßnahme mit weiteren biologischen Strategien verknüpft werden sollte.

Der Einsatz von Nematoden zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers wurden ebenfalls untersucht. Berry und Reed hielten 1997 die Wirksamkeit von isolierten Stämmen entomopathogener Nematoden (*Heterorhabditis* und *Steinernema*) zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers fest. Und auch Ebrahim et al. (2011) konnten eine Wirksamkeit von Isolaten von *Heterorhabditis* und *Steinernema* gegen *Leptinotarsa decemlineata* zeigen. Nachdem die Nematoden Kontakt zu einem Wirtsinsekt haben, dringen sie in die Insekten ein und setzen symbiontische Bakterien frei, wodurch das Wirtsinsekt abgetötet wird (Bathon, 2005). Bereits geringe Konzentrationen verursachen Verformungen der Flügel oder beeinflussen die Fitness adulter Kartoffelkäfer (Ebrahim et al., 2011).

Des Weiteren gibt es auch die Möglichkeit einer Bekämpfung des Kartoffelkäfers mittels Bakterienpräparaten. Dazu zählen Präparate auf Basis von *Bacillus thuringiensis* (*B.t.*). Diese sogenannten *B.t.*-Präparate enthalten meist Endotoxinkristalle und Sporen, wobei die Kristalle aus Proteinen bestehen und Protoxine repräsentieren. Sie werden beim Fraß von Insekten aufgenommen, gelöst und in toxische Untereinheiten gespalten, die zum Tode der Insekten führen. Zudem können darüber hinaus enthaltene Sporen auskeimen und die Vernichtung des Insekts vorantreiben. Es gibt *B.t.*-Präparate auf Basis unterschiedlicher Stämme von *Bacillus thuringiensis*, von denen einige eine Zulassung in Deutschland haben (Langenbruch et al., 2005). In Deutschland hat das Produkt Novodor FC® mit dem Wirkstoff *Bacillus thuringiensis* subspecies *tenebrionis* Stamm NB 176 (*B.t.t.*-Präparat) bis Mitte August 2023 eine Notfallzulassung nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 (BVL, 2023d; Langenbruch et al., 2005). Dieses *B.t.t.*-Präparat zeigt eine Wirksamkeit gegen Larven und adulte Käfer von *Leptinotarsa decemlineata* (Kühne et al., 2006; Langenbruch et al., 2005). Im Rahmen der Notfallzulassung darf es auch im ökologischen Landbau gegen Larven des Kartoffelkäfers im Larvenstadium 1 bis Larvenstadium 4 eingesetzt werden (BVL, 2023d).

Auch Actinomycetenpräparate mit dem Wirkstoff Spinosad stellen eine weitere Möglichkeit der Bekämpfung von *Leptinotarsa decemlineata* dar. Spinosad wird durch Fermentation aus dem Actinomyceten *Saccharopolyspora spinosa* gewonnen. Es handelt sich um ein Fraß- und Kontaktmittel, dass die neuronale Aktivität von Insekten beeinflusst, eine Hyperaktivität der Neuronen und Muskeln verursacht und anschließend zur Lähmung des Insekts führt (Becker, 2005). Die Insektizide SpinTor® und Ultima Käfer- und Raupenfrei® mit dem Wirkstoff Spinosad sind in Deutschland noch bis 2026 zugelassen (BVL, 2023b). Sie sind für den Einsatz im Kartoffelanbau gegen Kartoffelkäfer zugelassen und wurden 2008 beide der BVL-Liste für zugelassene Mittel für den ökologischen Landbau hinzugefügt (BVL, 2023a; Corteva, 2020).

Eine weitere Bekämpfungsmöglichkeit ist der Einsatz von Pilzpräparaten in Form von entomopathogenen Pilzen wie *Beauveria bassiana*. Der Pilz wird unter anderem von mit *Beauveria bassiana* verpilzten Insekten oder aus Bodenproben isoliert und auf einem

Nährmedium kultiviert. Entomopathogene Pilze können Eier, Larven und adulte Tiere befallen. Bei optimaler Temperatur und Luftfeuchtigkeit keimen die Sporen auf der Kutikula des Wirtsinsekts aus, dringen ein und interagieren mit dem Immunsystem des Wirts bis hin zur Abtötung und Sporulation (Zimmermann, 2005). In Deutschland ist das Produkt Naturalis® mit dem Wirkstoff *Beauveria bassiana* (Stamm ATCC 74040) noch bis 2024 als Akarizid und Insektizid zugelassen (BVL, 2023e). Allerdings liegt keine explizite Anwendungsempfehlung für *Leptinotarsa decemlineata* bei diesem Produkt vor, sondern hauptsächlich eine Anwendung als Insektizid gegen Weiße Fliege (Biofa, 2023b). Auch das Produkt Boverol® aus der Tschechischen Republik ist ein Mittel, das Konidien von *Beauveria bassiana* enthält und gegen den Kartoffelkäfer wirkt (Zimmermann, 2005). Bereits 1988 erforschte Dirlbek die Wirksamkeit von Boverol® zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers. In Deutschland ist es allerdings nicht zugelassen (BVL, 2023b).

Niempräparate mit dem Wirkstoff Azadirachtin werden aus dem Niembaum (*Azadirachta indica*) gewonnen. Azadirachtin beeinflusst vor allem das Fraßverhalten, die Metamorphose und die Fortpflanzung von Insekten. Es wurde festgestellt, dass, wenn Kartoffelkäfer während des Larvenstadiums in Kontakt mit Azadirachtin kommen, oft Folgeschäden entstehen, indem die Flügel Verformungen aufweisen und die Käfer somit nicht fliegen können (Kaethner, 1992; Schmutterer, 2005). Darüber hinaus wird auch das Hormon Ecdyson, das für die Häutung zuständig ist (Huber, 2005), durch die Aufnahme von Azadirachtin beeinflusst, was den Einfluss auf die Metamorphose erklärt (Schmutterer, 2005). Mit Niemöl behandelte Larven wiesen zudem eine erhöhte Mortalität auf (Kaethner, 1992). Kaethner (1992) stellte fest, dass eine Behandlung mit Niemöl und Niem-Extrakten bei adulten Kartoffelkäfern zu einer reduzierten Futteraufnahme und reduzierten Fekundität führte. Die Anzahl der Eigelege und Anzahl Eier im Gelege waren verringert. Dies erklärte Kaethner (1992) mit juvenilen Hormonen und Ecdysteroiden, die an der Fortpflanzung beteiligt sind. Die damit einhergehende Eiproduktion wurde infolgedessen, abhängig von der erhaltenen Menge Azadirachtin, reduziert. Derzeit sind 28 Mittel (Stand: 14.07.2023) mit dem Wirkstoff Azadirachtin als Insektizide in Deutschland zugelassen (BVL, 2023b). 26 dieser Mittel sind für die Anwendung gegen *Leptinotarsa decemlineata* zugelassen (BVL, 2023b) und sind auch auf der Liste zugelassener Mittel für den ökologischen Landbau eingetragen (BVL, 2023a).

Insgesamt sind laut Datenbank des Bundesamts für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) derzeit 131 Mittel (Stand: 14.07.2023) aus dem Wirkungsbereich der Insektizide für die Bekämpfung gegen den Kartoffelkäfer in Deutschland zugelassen (BVL, 2023b). Dazu zählen auch Präparate mit Wirkstoffen, die zur Gruppe der Pyrethroide (z.B. Deltamethrin, lambda-Cyhalothrin und Cypermethrin) zugehörig sind, und Präparate mit dem Wirkstoff Pyrethrine (BVL, 2023b). Pyrethrum ist pflanzlicher Herkunft und wurde Mitte des 20. Jahrhunderts von synthetischen Insektiziden, unter anderem auch von synthetischen

Pyrethroiden, abgelöst. Da synthetischen Pyrethroiden aber umweltschädigende Eigenschaften nachgesagt wurden, wurde wieder auf Pyrethrum zurückgegriffen. Pyrethrum wirkt zum einen abtötend, zum anderen abschreckend und gehört zur Gruppe der Kontaktinsektizide. Es kommt zur Lähmung der betroffenen Insekten und kann zum anschließenden Tode dieser führen (Stein, 2005a).

Zusätzlich zu den bisher aufgelisteten Kontrollmaßnahmen gegen *Leptinotarsa decemlineata* sind auch genetische Veränderungen von Kartoffelpflanzen denkbar. Durch den Einbau bestimmter Gene des Bakteriums *B.t.t.* können Kartoffelpflanzen gentechnisch so verändert werden, dass sie gegen einen Befall durch Kartoffelkäfer widerstandsfähiger sind (Perlak et al., 1993). Überdies gibt es auch molekularbiologische Maßnahmen, indem man auf die Methode der RNA-Interferenz zurückgreift. Hierbei werden den Kartoffelkäfern z.B. Bakterien zugeführt, die doppelsträngige RNA (dsRNA) produzieren. Dadurch werden bestimmte Gene beim Kartoffelkäfer ausgeschaltet und können zum Tode der Käfer führen (Zhu et al., 2011).

Wie bereits erwähnt sind die einzelnen Maßnahmen aus verschiedenen benannten Gründen alleine meist nicht wirksam genug und sollten daher in Kombination Anwendung finden. Alyokhin (2009) fasste ebenfalls zusammen, dass Landwirte integrierten Pflanzenschutz (IPS) betreiben und keine Insektizide einsetzen sollten, solange die Dichte der Kartoffelkäfer nicht die wirtschaftlichen Schwellenwerte überschreitet. Alle Maßnahmen sollten sich daher am besten in die acht Prinzipien des IPS einfügen (Barzman et al., 2015).

1.2 Vorkommen und Biologie von *Aphis fabae*

Die Schwarze Bohnenblattlaus (*Aphis fabae* Scopoli L.) ist ein weit verbreiteter Schädling in den gemäßigten Regionen der nördlichen Hemisphäre und kommt auch in Südamerika und Afrika vor. In den heißeren Teilen der Tropen und des Nahen Ostens kommt sie kaum vor, dort wurde sie zunehmend durch *Aphis fabae solanella* verdrängt (Blackman & Eastop, 2000). Die Schwarze Bohnenblattlaus gehört systematisch zum Stamm der Gliederfüßer (Arthropoda) und darunter zur Klasse der Insekten (Insecta). Sie ist zugehörig zur Ordnung der Pflanzensauger (Homoptera), zur Unterordnung der Blattläuse (Aphidina) und kann darüber hinaus der Familie der Röhrenblattläuse (Aphididae) zugeordnet werden. Pflanzensauger besitzen meist gleichartige, häutige Vorder- und Hinterflügel (Hallmann et al., 2009). Schwarze Bohnenblattläuse sind 1,5 mm bis 3 mm groß, besitzen röhrenförmige Siphonen am Hinterleib und besitzen stechend-saugende Mundwerkzeuge.

Die schwarze Bohnenblattlaus gehört als Teil der Familie der Aphididae mit zu den größten und auch wirtschaftlich Bedeutendsten der Blattläuse. Sie lebt, wie die meisten Pflanzensauger, polyphag und ist einer der wichtigsten Schaderreger vieler Kulturarten, wie z.B. Zuckerrüben, Ackerbohnen oder Gartenbohnen und verursacht starke Saugschäden

(Hallmann et al., 2009; Meyhöfer & Poehling, 2013). Als Phloemsauger verursachen Blattläuse direkte und indirekte Schäden an Pflanzen. Zum einen entziehen sie durch das Anstechen den Pflanzen direkt Nährstoffe (Vandenborre et al., 2009), wodurch charakteristische Symptome wie verkümmerte Triebspitzen und eingerollte Blätter hervorgerufen werden (Hallmann et al., 2009). Zum anderen verursachen sie durch das Anstechen einen indirekten Schaden, indem sie Viren übertragen können (Vandenborre et al., 2009). Die schwarze Bohnenblattlaus ist ein bedeutender Virusvektor unter den Aphiden und kann Überträger für ca. 50–60 unterschiedliche Viren, wie z.B. Potato leaf roll virus (Blattröllkrankheit bei Kartoffeln), Beet yellows virus (Viröse Vergilbungen an Rüben) oder Cucumber mosaic virus (Gurkenmosaikvirus) an verschiedenen Kulturen sein (Hallmann et al., 2009; Meyhöfer & Poehling, 2013). Außerdem kann der von den Läusen ausgeschiedene Honigtau als Nährgrundlage für Schwärzepilze dienen, was zu Verschmutzungen und Verlusten des Erntegutes führen kann (Hallmann et al., 2009).

Darüber hinaus entwickelt sich *Aphis fabae* holozyklisch mit Wirtswechsel. Dabei dienen Pfaffenhütchen oder Schneeball als Winterwirt und als Sommerwirt kommen 400 unterschiedliche Kulturen in Frage (Hallmann et al., 2009; Meyhöfer & Poehling, 2013). Zur Zeit des Knospensprungs schlüpft aus einem überwinterten Ei die sogenannte Stammutter am Hauptwirt. Nach ihrer eigenen Entwicklung erzeugt sie parthenogenetisch und vivipar meist ungeflügelte Jungläuse. Die darauffolgenden Generationen weisen auch geflügelte Formen auf, die dann zu den Sommerwirten übergehen (Blackman & Eastop, 2000; Hallmann et al., 2009). In einer Vegetationsperiode können zehn Generationen ohne Wirtswechsel vorkommen. Im Herbst entwickeln sich dann ungeflügelte Männchenmütter und geflügelte Weibchenmütter (Hallmann et al., 2009). Zum Ende der Vegetationsperiode treten wieder beide Geschlechter geflügelt auf, siedeln auf den Hauptwirt um, sodass es zur Fortpflanzung kommt und die neue Generation als Eier am Hauptwirt überwintert (Blackman & Eastop, 2000; Hallmann et al., 2009). Generell durchläuft eine Blattlaus vier Nymphenstadien. Diese Entwicklung zum adulten Tier dauert je nach Temperatur fünf (25°C) bis zwölf (15°C) Tage. Darüber hinaus kann eine adulte Blattlaus bei einer Temperatur von 15°C bis zu 47 Tage alt werden (Akca et al., 2015).

1.2.1 Bekämpfungsmaßnahmen gegen Blattläuse

Chemische Maßnahmen

Auch für die Bekämpfung der Blattlaus stehen unterschiedliche chemische und nicht-chemische Kontrollmaßnahmen zur Verfügung. Bereits vor dem Zweiten Weltkrieg wurden Blattläuse mit Nikotin bekämpft. Es tötete Blattläuse ab, die mit dem Nikotin in Berührung kamen. Da sich herausstellte, dass es extrem giftig für Wirbeltiere ist, ist es seit den 1990er Jahren in Europa nicht mehr zugelassen. Im Laufe der Zeit wurden die ersten

Chlorkohlenwasserstoffe, wie DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan) als Insektizide entdeckt. Nach dem Krieg machte die chemische Bekämpfung von Blattläusen schnelle Fortschritte mit anderen chlororganischen Verbindungen. Es folgten Wirkstoffe wie Organophosphorverbindungen, Carbamate und synthetische Pyrethroide (Dedryver et al., 2010; Ware, 2000). Organophosphate haben allerdings eine hohe Toxizität für Säugetiere und müssen mehrfach angewendet werden, da sie im Allgemeinen nicht persistent sind. Es sind Nervengifte, die wie Carbamate durch Hemmung der Cholinesterase wirken (Ware, 2000). Die Wirkungsweise von Pyrethroiden, Neonikotinoiden und vielen anderen Insektiziden beruht auf der Beeinflussung sowohl des peripheren, als auch des zentralen Nervensystems der Insekten, was schlussendlich zu Lähmungen und zum Tode dieser führt (Ware, 2000). Dennoch sind in Deutschland Pyrethroide z.B. mit den Wirkstoffen lambda-Cyhalothrin oder Deltamethrin, Neonikotinoide, wie Mospilan SG® mit dem Wirkstoff Acetamiprid oder auch Carbamate wie der Wirkstoff Pirimicarb, für die Anwendung gegen Blattläuse zugelassen (BVL, 2023b). Laut BVL sind derzeit 233 Mittel (Stand: 14.07.2023) aus dem Wirkungsbereich der Insektizide für die Bekämpfung gegen Blattläuse in Deutschland zugelassen. Doch bei einer Applikation schaden sie nicht nur Blattläusen, sondern auch anderen Insekten, die nicht als Schadorganismen gelten, wie z.B. Nützlingen. Nach Unal und Jepson (1991) schädigen die Rückstände von PSM mit Wirkstoffen wie Deltamethrin und Pirimicarb die Nützlinge *Bembidion lampros* und *Coccinella septempunctata*, wobei Pirimicarb eine geringere Toxizität aufwies als Deltamethrin. Zudem führt, wie in Kapitel C 1.1.1 bereits erwähnt, eine häufige Anwendung von Insektiziden zu einer raschen Entwicklung von Resistenzen von Insekten gegenüber diesen Wirkstoffen (Alyokhin et al., 2008). 1908 wurde das Phänomen der Resistenz von Insekten gegen PSM erstmals an der San José Schildlaus in Obstbauplantagen in den USA entdeckt (Raßmann, 1973). Im Jahr 1980 gab es bereits über 400 Arthropoden, darunter 18 Blattlausarten, die Resistenzen gegen Insektizide entwickelt hatten (Devonshire, 1989).

Physikalische Maßnahmen

Neben dem Einsatz von Insektiziden erweisen sich bei Blattläusen auch kulturspezifische Maßnahmen als Strategien zur Eindämmung (Dedryver et al., 2010). Zum Beispiel kann der Einsatz von Mulchmaterialien im Gemüseanbau den Blattlausbefall um 50% reduzieren. Denn z.B. durch Strohmulch kann für zufliegende Blattläuse die Unterscheidung zwischen Wirtspflanze und Untergrund erschwert werden. Durch die Anwendung verschieden farbiger und unterschiedlich strukturierter Vliese kann dieser Effekt noch verstärkt werden (Hommes et al., 2003). Zudem eignen sich auch passende Anbaustrategien, wie veränderte Saatzeitpunkte bestimmter Kulturen. Durch diese Maßnahmen kann vermieden werden, dass der Zeitpunkt wandernder Blattläuse und besonders anfällige Stadien der Kulturpflanzen nicht aufeinandertreffen (Dedryver et al., 2010). Auch kann die Auswahl der Kulturpflanzen-Sorte

den Befall zum Teil stark beeinflussen, da unterschiedliche Sorten verschiedene Resistenzen gegen die Schwarze Bohnenblattlaus aufweisen (Müller, 1958). Bei *Aphis fabae* als holozyklisch lebende Art ist es ebenfalls denkbar, den Winterwirt in unmittelbarer Nähe zum Feld zu beseitigen. Wratten et al. (2007) haben darüber hinaus weitere kulturspezifische Maßnahmen gegen Blattläuse aufgelistet. Dazu zählen neben den bisher erwähnten Maßnahmen z.B. auch Reihenabdeckungen, um die Kulturen vor Blattläusen abzuschirmen, das Besprühen der Kulturen mit reflektierenden Materialien, um diese für die Wahrnehmung der Blattläuse zu verändern, oder eine Reduktion der Pflanzdichte, da die Dichte einen Einfluss auf das Auftreten und die Ausbreitung der Blattläuse hat. Zusammengefasst nach Wratten et al. (2007) kann in einigen Fällen auch ein Rückschnitt der Pflanzen eine sinnvolle Maßnahme sein, da bestimmte Pflanzenteile anfälliger sind als andere. Sinnvoll können aber auch Änderungen im Bewässerungs- und Düngemanagement sein, da die Blattlausentwicklung von der Qualität des Pflanzensaftes abhängt, welcher mit der Entwicklung und Bewirtschaftung der Kulturen einhergeht. Des Weiteren werden Maßnahmen wie der Anbau von Zwischenfrüchten, Deckfrüchten und Trap-Crops als mögliche Strategien gegen Blattläuse aufgeführt (Wratten et al., 2007).

Biologische Maßnahmen

Zu den biologischen Kontrollmaßnahmen der Blattlaus zählt unter anderem der Einsatz von natürlichen Gegenspielern. Dabei kommen generell Gegenspieler zum Einsatz, die aus demselben geografischen Gebiet stammen wie die zu bekämpfende Art, aber auch einheimische Arten, um die Population der Blattläuse zu kontrollieren. Wichtig ist dabei auch, die Populationsdichte der natürlichen Gegenspieler durch ein geeignetes Management hoch zu halten, um die Blattlauspopulation unter der wirtschaftlichen Schwelle halten zu können (Dedryver et al., 2010). Zur Prävention und Bekämpfung von Blattläusen ist daher die Schaffung von Ausgleichsflächen wie Ackerrandstreifen und Hecken als Habitat für natürlich vorkommende Nützlinge wichtig (Hallmann et al., 2009). Eine Stabilität der Nützlings-Schädlings-Beziehung ist von besonderer Bedeutung. Vor allem, wenn es um den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) geht, sollten „nützlingsschonende“ Produkte eingesetzt werden (Gisi, 2013). Zur biologischen Kontrolle von Blattläusen werden häufig Nützlinge wie Prädatoren und Parasitoide eingesetzt. Prädatoren töten ihre Beute sofort und benötigen eine hohe Anzahl an Beutetieren, um ihre Entwicklung abzuschließen. Parasitoide hingegen legen ihre Eier in oder auf ihre Beute, vollenden ihre Entwicklung im jeweiligen Insekt und töten es erst anschließend ab. Dabei sind Prädatoren oft Generalisten, die sich von vielen verschiedenen Arten von Beutetieren ernähren. Die meisten Parasitoide hingegen sind Spezialisten, die einen bestimmten Wirt haben, in bzw. auf dem sie ihre Eier ablegen und sich entwickeln (Patterson & Ramirez, 2016). Snyder und Ives (2001) stellten in ihren

Untersuchungen fest, dass der Einsatz von *Pterostichus melanarius* als generalistischer Prädator zu einer sofortigen, aber nur kurzzeitigen Abnahme der Blattlausdichte führte. Gleichzeitig wurde aber auch die Kontrolle der Blattlauspopulation durch spezialisierte Parasitoide wie *Aphidius ervi* durch diese Generalisten unterbrochen. Denn generalistische Prädatoren können nicht nur Blattläuse angreifen, sondern auch die spezialisierten natürlichen Parasitoide befallen (Snyder & Ives, 2001).

Eine weitere Beeinflussung, welche wiederum die Parasitoide betrifft, ist der Hyperparasitismus. In einem Gewächshausexperiment von Schooler et al. (2011) tötete der Hyperparasitoid *Asaphes suspensus* die gesamte Population des Primärparasitoiden *Aphidius ervi* der Erbsenblattlaus (*Acyrtosiphon pisum*). Der Primärparasitoid *Aphidius ervi* alleine eliminierte in Abwesenheit von *Asaphes suspensus* die gesamte Erbsenblattlauspopulation. Blattlausparasitoide sind daher selbst einer Vielzahl von natürlichen Feinden ausgesetzt, u.a. Prädatoren, Pilzen und Hyperparasitoiden. Die größte Herausforderung für den Einsatz von Blattlausparasitoiden als biologische Bekämpfungsmaßnahme ist die Umsetzung einer entsprechenden Massenaufzucht (Boivin et al., 2012). Die meisten Blattlausparasitoide gehören zu den Hautflüglern der Familien Braconidae, Aphelinidae (Boivin et al., 2012) oder Apocrita (Patterson & Ramirez, 2016), andere Arten gehören hingegen zu den Zweiflüglern der Familie Cecidomyiidae (Boivin et al., 2012). Zu den Prädatoren der Blattlaus sind unterschiedliche Familien der Coleoptera, wie z.B. Marienkäfer (Coccinellidae) oder Weichkäfer (Cantharidae) sowie Prädatoren unterschiedlicher Familien der Diptera, wie z.B. Langbeinfliegen (Dolichopodidae) oder Larven der Schwebfliegen (Syrphidae) zugehörig. Darüber hinaus zählen auch Familien der Hemiptera und Neuroptera zu den Prädatoren der Blattlaus (Patterson & Ramirez, 2016).

Des Weiteren besteht auch bei Blattläusen die Möglichkeit einer Bekämpfung mittels Pilzpräparaten in Form von entomopathogenen Pilzen. *Verticillium lecanii* ist die häufigste entomopathogene Art von *Verticillium*, einer als Welkeerreger bekannten Pilzgattung. Neben entomopathogenen Eigenschaften besitzt *Verticillium lecanii* auch hyperparasitische Eigenschaften. Der Pilz wird unter anderem von Insekten und aus Böden isoliert (Zimmermann, 2005). Die Firma Koppert Biological Systems vertreibt das Produkt Mycotal® auf Basis des entomopathogenen Pilzes *Lecanicillium muscarium* (Ve6). Koppert Biological Systems (2020) beschreiben in einem eigenen Bericht, dass durch den Einsatz von Mycotal® Blattlauspopulationen signifikant reduziert werden können. Derzeit ist das Produkt nicht in Deutschland zugelassen (Koppert Biological Systems, 2020). Bei *Lecanicillium muscarium* handelt sich um die entomopathogenen Isolate von *Verticillium lecanii*, die der Gattung *Lecanicillium* zugeordnet wurden (Zimmermann, 2005). Auch das Produkt Vertalec® wurde vor einiger Zeit noch von Koppert Biological Systems vertrieben (Kim et al., 2010). Hierbei handelte es sich um ein Produkt auf Basis von *Lecanicillium longisporum* (Kim et al., 2010;

Zimmermann, 2005). Kim et al. (2010) konnten in ihren Versuchen zeigen, dass durch den Einsatz von Vertalec® die Anzahl der überlebenden Blattläuse im Vergleich zur Wasser-Kontrolle signifikant reduziert werden konnte.

Darüber hinaus sind derzeit auch Präparate aus der Wirkstoffgruppe der Pyrethrine in Deutschland zugelassen (BVL, 2023b). Nach Stein (2005a) können Pyrethrumpräparate in unterschiedlichen Kulturen gegen verschiedene Blattlausarten eingesetzt werden. Die Wirkungsweise ist bereits in Kapitel C 1.1.1 beschrieben. Im ökologischen Landbau gibt es mehrere Wirkstoffe, die gegen Blattläuse eingesetzt werden können (BVL, 2023a). Neben Präparaten aus der Wirkstoffgruppe der Pyrethrine zählt dazu beispielsweise auch Kaliseife, welche ebenfalls als Kontakt- und Netzmittel auf Läuse wirkt. Beide können allerdings Nützlinge wie Schlupfwespen und Raubmilben schädigen (Kühne et al., 2006).

Niempräparate mit dem Wirkstoff Azadirachtin werden ebenfalls zur Kontrolle von Blattläusen eingesetzt. In Deutschland sind einige Produkte mit dem Wirkstoff zugelassen (BVL, 2023b), die ebenfalls auf der Liste zugelassener Mittel für den ökologischen Landbau eingetragen sind (BVL, 2023a). Azadirachtin kann systemisch wirken, denn Pflanzen können es aufnehmen und in die Blätter leiten. Saugende Insekten wie Läuse nehmen das Azadirachtin dann über den Pflanzensaft mit auf, wodurch sie geschädigt werden können (Schmutterer, 2005). Die insektizide Wirkung beruht hierbei in erster Linie auf dem Inhaltsstoff Azadirachtin (Schmutterer, 2005), wodurch das Hormon Ecdyson der Insekten gehemmt und somit deren Entwicklung beeinträchtigt wird (Huber, 2005). Dimetry und Schmidt (1992) haben festgestellt, dass die Fruchtbarkeit und Lebensdauer von adulten Schwarzen Bohnenblattläusen auf Bohnenpflanzen durch den Einsatz von Neem-Azal S® oder Margosan-O® signifikant reduziert werden konnten. Es ist ebenfalls möglich Niemöl mit Entomopathogenen zu mischen, um einen höheren Wirkungsgrad zu erlangen. Nach Halder und seinen Kollegen (2013) erreichten applizierte Kombinationen von Niemöl und Entomopathogenen bei allen getesteten saugenden Insekten eine höhere Wirksamkeit als das jeweilige Pflanzenschutzmittel alleine. Auch Quassiapräparate mit dem Wirkstoff Quassin sind Naturstoffe, die lange Zeit im Bereich der Schädlingsbekämpfung eingesetzt wurden. Es handelt sich dabei um ein Fraß- und Kontaktmittel (Stein, 2005b). Das Produkt Quassiaextrakt MD® erhielt nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 für den Zeitraum Mitte März 2023 bis Mitte Juli 2023 eine Notfallzulassung auch zur Anwendung gegen Blattläuse, vor allem nach dem Blattlauszuflug, sobald ein bestimmter Schwellenwert erreicht war (BVL, 2023f).

Darüber hinaus gibt es auch die Möglichkeit Blattläuse mit Rotenonpräparaten zu kontrollieren. Rotenon kann z.B. aus den Wurzeln von *Derris elliptica* gewonnen werden. Allerdings sind diese Präparate in Deutschland nicht zugelassen, anders als in anderen europäischen Ländern. Dort werden sie als Fraß- und Kontaktmittel eingesetzt (Stein, 2005b).

Auch bei Blattläusen sind einzelne Maßnahmen meist nicht hinreichend wirksam und sollten daher ebenfalls in Kombination eingesetzt werden. Es gibt verschiedene landwirtschaftliche Praktiken, die es ermöglichen, den Befall von Blattläusen an Nutzpflanzen zu vermeiden oder zu reduzieren, vor allem in Kombination mit unterschiedlichen biologischen Kontrollmaßnahmen. Auch hierbei sollten daher die Regeln und vor allem die acht Prinzipien des IPS beachtet werden (Barzman et al., 2015), die für das Management von Blattläusen zur Verfügung stehen (Dedryver et al., 2010).

1.3 Pflanzenöle als Insektizide

Die Wirkung von Pflanzenölen als Insektizide wurde ebenfalls bereits untersucht. Auch in diesem Kapitel geht es nur um den Einsatz von glyceridischen Pflanzenölen als Insektizide, nicht um den Einsatz von ätherischen Ölen.

Es wurden bereits eine ganze Reihe von Untersuchungen zu glyceridischen Pflanzenölen als Insektizide durchgeführt, beispielsweise der Einsatz von Sonnenblumenöl. Weiher et al. (2007) konnten in ihren Untersuchungen eine kurzzeitige Wirkung von Sonnenblumenöl gegenüber dem Rapsglanzkäfer erzielen. Sie erwähnten, dass eine Mehrfachbehandlung nötig wäre, um eine Regulierung während des Zuflugs zu erreichen, denn der bereits getrocknete Spritzbelag hatte auf die neu zugeflogenen Käfer keine Auswirkung. Njoroge und Berenbaum (2019) untersuchten die Auswirkungen verschiedener Pflanzenöle auf das Überleben und das Eiablageverhalten von *Aedes aegypti*. Neben Sonnenblumenöl zeigten Erdnussöl, Hanfsamenöl und Olivenöl vor allem auf die Überlebensrate der Larven eine reduzierende Wirkung. Njoroge und Berenbaum (2019) führten diese Wirkung auf die Fettsäurezusammensetzung der Öle zurück. Auch Öle, die aus unterschiedlichen Senfarten wie *Brassica juncea* und *Sinapis alba* gewonnen werden, sind potenziell nützliche Ausgangsstoffe für die Herstellung von Insektiziden gegenüber *Myzus persicae*. Dennoch sollten zunächst zusätzliche Untersuchungen an weiteren Insekten durchgeführt werden (Hansson et al., 2012). Nach Pehlevan und Kovanci (2018) scheinen neben Senföl auch Leinsamen-, Bittermelonen- und Artischockenöl Kandidaten für die Entwicklung von Bekämpfungsmitteln gegen Eier und Nymphen des Birnensaugers (*Cacopsylla pyricola*) zu sein. Darüber hinaus gab es auch erfolgreiche Laboruntersuchungen zur Wirkung von Baumwollsaamen-, Sojabohnen-, Erdnuss- und Palmöl gegenüber den Käfern *Cryptolestes pusillus* und *Rhyzopertha dominica* als Schutzmittel in der Getreidelagerung (Obeng-Ofori, 1995). Die Forschung von Deyton et al. (2002) zeigte außerdem das Potenzial von Sojabohnenöl im Freiland, indem eine hohe Mortalität von Schildläusen nach Applikation erreicht werden konnte.

Obwohl es demnach schon einige Untersuchungen zu glyceridischen Pflanzenölen als Insektizide gibt, sind laut Datenbank für zugelassene Pflanzenschutzmittel vom BVL derzeit,

neben Mitteln auf Basis von Orangenöl (ätherisches Öl) und Niemöl (Wirkstoff Azadirachtin), hauptsächlich Rapsölpräparate als Insektizide zugelassen (BVL, 2023b). Beim Einsatz von Niemöl, wie in Kapitel C 1.1.1 bereits beschrieben, liegt ebenfalls ein anderer Wirkungsmechanismus zu Grunde als bei glyceridischen Pflanzenölen. Rapsöl hingegen ist derzeit das einzige glyceridische Pflanzenöl, das auch für den ökologischen Landbau zugelassen ist (BVL, 2023a). Es wird gegen unterschiedliche Schadinsekten eingesetzt und zeigt eine Wirkung gegen Blattläuse und in Kombination mit Pyrethrum gegen Kartoffelkäfer (Kühne et al., 2006). Vor allem gegen *Myzus persicae* (Marčić et al., 2009; Martín López et al., 2003) und *Myzus cerasi* (Jaastad, 2007) konnte durch den kurativen Einsatz von Rapsöl in unterschiedlichen Versuchen eine insektizide Wirkung gezeigt werden. Da das Rapsöl leicht im Boden abgebaut wird und nicht bienengefährdend ist (Roth & Kormann, 2005), können auch Mehrfachbehandlungen durchgeführt werden. Durch eine Mehrfachbehandlung mit Rapsöl konnte z.B. eine insektizide Wirkung gegenüber *Phyllocnistis citrella* erzielt werden (Beattie et al., 2002). Beim Rapsöl handelt es sich um ein halbtrocknendes Pflanzenöl (vgl. Tabelle 1, Kapitel A 1.2), bei dem die insektizide Wirkung auf einem Ölfilm beruht, der die Insekten überzieht (Roth & Kormann, 2005) und die Atemöffnungen der Insekten verschließt (Kühne et al., 2006). Darüber hinaus verkleben die Insekten, sodass sie und ihre Eier ersticken. Rapsöl hat sich als besonders wirksam gegen beißende und saugende Schädlinge erwiesen (Roth & Kormann, 2005; Zunker & Schneller, 2014a), wie z.B. gegenüber *Rhagoletis cerasi* an Kirschen (Daniel, 2014) oder *Saissetia oleae* an Oliven (Nicetic et al., 2010). Brendel (2013) konnte zudem in einem Versuch an Rosen zeigen, dass durch Leinöl, in einem Gemisch mit Orangenöl, eine insektizide Wirkung gegenüber der Kleinen Weißen Rosenschildlaus (*Aulacaspis rosae*) erzielt werden konnte. Und auch durch den Einsatz von Tungöl konnte in Fütterungsversuchen bereits vor Jahren eine abschreckende Wirkung gegenüber dem Baumwollkapselkäfer nachgewiesen werden (*Anthonomus grandis*) (Jacobson et al., 1981). Leinöl und Tungöl gehören aufgrund ihrer Eigenschaften zur Gruppe der trocknenden Pflanzenöle (Tabelle 1, Kapitel A 1.2). Neben der abschreckenden Wirkung des Tungöls (Jacobson et al., 1981) können Schadinsekten also auch durch den direkten Kontakt mit Pflanzenölen abgetötet werden (Zunker & Schneller, 2014a; Zunker & Schneller, 2014b). Bográn et al. (2006) stellten fest, dass die meisten Produkte auf Ölbasis, unabhängig von ihrer Herkunft, eine ähnliche Wirkungsweise aufweisen, wenn sie als Insektizide eingesetzt werden. Sie töten die Schadinsekten ab, indem sie die Nahrungsaufnahme auf mit Öl bedeckten Oberflächen stören, die Funktion der Zellmembran negativ beeinflussen oder den Gasaustausch bzw. ihre Atmung beeinträchtigen (Bográn et al., 2006). Die insektizide Wirkung beruht vielmehr auf einer physikalischen Wirkungsweise als auf einer chemischen. Durch die direkte Erstickungswirkung der Pflanzenöle wird eine Entwicklung von Resistenzen als unwahrscheinlich angesehen (Weiher et al., 2007).

1.4 Hypothesen

Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse von Pflanzenölen gegenüber Schädlingen und der bisher bekannten Wirkung von trocknenden Pflanzenölen wurden die Hypothesen aufgestellt, dass die Wirkung trocknender Pflanzenöle auf Schädlinge von der Konzentration abhängt (**H1**) und, dass diese Wirkung gegenüber Schädlingen vom Applikationszeitpunkt der Öle (**H2**) abhängt. Darüber hinaus wurde vermutet, dass die trocknenden Pflanzenöle vor allem die Mortalität und Fekundität von Schädlingen beeinflussen (**H3**).

2 Material und Methoden

Um diese Hypothesen zur Wirkung der Pflanzenöle in Bezug auf Schädlinge zu untersuchen, wurden am Beispiel des Kartoffelkäfers (*Leptinotarsa decemlineata*) an Kartoffelpflanzen (*Solanum tuberosum*) und der Schwarzen Bohnenblattlaus (*Aphis fabae*) an Ackerbohnen (*Vicia faba*) unterschiedliche in vitro und in vivo Versuchsreihen durchgeführt. In diesen Versuchsreihen wurde vor allem die Wirkung der trocknenden Pflanzenöle auf die Fekundität und Mortalität von Schwarzen Bohnenblattläusen und die Überlebensrate von larvalen und adulten Kartoffelkäfern an Kartoffelpflanzen untersucht.

2.1 Versuche zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber *Leptinotarsa decemlineata*

2.1.1 Pflanzenmaterial und Schädlinge

Für die geplanten Gewächshausversuche wurden Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*), sowohl Larven als auch Adulte, und Kartoffelblätter (Sorte: Belana) aus einem parallel durchgeführten Freilandversuch am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn gesammelt. Die ausgewählten Blätter unterlagen keinen Pflanzenschutzmaßnahmen, somit konnten Effekte durch mögliche vorherige Maßnahmen ausgeschlossen werden. Das Einsammeln der Blätter und Kartoffelkäfer erfolgte jeweils in den Randreihen des Freilandversuchs. Insgesamt wurden somit für die Gewächshausversuche unbeschädigte, vitale und gleichaltrige Blätter, adulte Kartoffelkäfer und Larven des L3 Stadiums eingesammelt und verwendet.

2.1.2 Versuchsdurchführung und Bewertung

Um die insektizide Wirkung der trocknenden Pflanzenöle Leinöl (L), Tungöl (T) und des halbtrocknenden Rapsöls (R) zu bewerten, wurden in vitro Versuche mit adulten und larvalen Kartoffelkäfern durchgeführt. Die protektive und kurative insektizide Wirkung der drei Pflanzenöle wurde jeweils im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K) getestet. Die Herstellung der Öle erfolgte nach der Beschreibung in Kapitel A 2.1.2. Für die insektizide Wirkung der Pflanzenöle gegenüber den Käfern und Larven wurden jeweils Ölkonzentrationen von 5% eingesetzt. Für die in vitro-Experimente wurden die gesammelten Kartoffelkäfer und

Kartoffelblätter auf insgesamt 56 transparente Plastikboxen (L: 17 cm; B: 12 cm; H: 6 cm) aufgeteilt. Die Boxen wurden mit Löchern für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr und –abfuhr versehen. Anschließend wurden die Versuche der Larven und Adulten getrennt voneinander durchgeführt. Jede Box wurde mit Küchenpapier und einem Kartoffelblatt ausgestattet. Anschließend wurden entweder sechs Larven oder vier Adulte pro Box darauf platziert. Die Applikation der Pflanzenöle wurde einmalig mit Handsprühern auf der abaxialen und adaxialen Seite der Kartoffelblätter durchgeführt, bis die Blätter komplett benetzt waren. Das Applikationsschema für die Untersuchungen von *Leptinotarsa decemlineata* ist in Tabelle 10 beschrieben. Um die protektive Wirkung zu bewerten, wurde die erste Gruppe von Kartoffelblättern mit Pflanzenölen behandelt, einen Tag bevor entweder sechs Larven oder vier Adulte in jede Box gesetzt wurden. Die kurative Wirkung wurde bei der zweiten Gruppe getestet, indem die Applikation der Pflanzenöle unmittelbar nach dem Aufsetzen der Larven und adulten Käfer auf die Kartoffelblätter erfolgte. Als Kontrolle wurden Larven und Adulte, ebenfalls getrennt voneinander, in Boxen mit unbehandelten Kartoffelblättern gesetzt. Alle Boxen wurden unter kontrollierten Bedingungen ($18 \pm 1^\circ\text{C}$ in der Nacht und $20 \pm 2^\circ\text{C}$ am Tag, 12 h Licht pro Tag) im Gewächshaus aufgestellt. Insgesamt wurde der Versuch pro Variante in vierfacher Wiederholung durchgeführt.

Tabelle 10: Behandlungen und Beschreibung der zeitlichen Abfolge der Öl-Applikation und Platzierung der Kartoffelkäfer (Larven und Adulte) auf Kartoffelblättern für die Untersuchungen zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber *Leptinotarsa decemlineata*.

Behandlung	Zeitliche Abfolge
protektiv (erste Gruppe)	1. Kartoffelblätter mit Ölen behandeln 2. Larven und adulte Kartoffelkäfer einen Tag nach Behandlung auf behandelten Kartoffelblättern platzieren
kurativ (zweite Gruppe)	1. Larven und adulte Kartoffelkäfer auf unbehandelten Kartoffelblättern platzieren 2. Kartoffelblätter + Larven und adulte Kartoffelkäfer mit Ölen behandeln

Für die anschließende Auswertung erfolgte eine tägliche Kontrolle inklusive Bonitur der Larven und Käfer. Es wurde pro Box die Anzahl überlebender und gestorbener Käfer und Larven festgehalten und pro Variante prozentual ermittelt. Die Mortalität von Kartoffelkäferlarven und adulten Kartoffelkäfern wurde über einen Zeitraum von bis zu sechs Tagen nach Behandlung beobachtet.

2.2 Versuche zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber *Aphis fabae*

2.2.1 Pflanzenanzucht

Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) der Sorte „Groene Hangers“ wurden in 10er Töpfen in kommerziellen Kultursubstrat (Profisubstrat, Einheitserde Classic, Typ ED 73 (Weißtorf (Hochmoortorf) und Lehm)) ausgesät. Im Anschluss wurden alle Töpfe auf Ebbe-Flut-Tischen

im Forschungsgewächshaus am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn platziert. Die Anzucht der Ackerbohnen erfolgte für vier Wochen unter kontrollierten Bedingungen ($20 \pm 3^\circ\text{C}$ in der Nacht und $23 \pm 5^\circ\text{C}$ am Tag, 12 h Licht pro Tag) und täglicher Bewässerung.

2.2.2 Blattlausstammzucht

Die Abteilung Agrarentomologie des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften der Universität Göttingen hat aus ihrer Stammzucht Schwarze Bohnenblattläuse (*Aphis fabae*) zur Verfügung gestellt. In einer Klimakammer am Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn wurde anschließend eine eigene Blattlausstammzucht auf Ackerbohnen herangezogen. Die Aufzucht in der Klimakammer erfolgte unter kontrollierten Bedingungen ($21 \pm 1^\circ\text{C}$, rF $80 \pm 5\%$ und 16 h Licht pro Tag). Die verwendeten Ackerbohnen wurden vorab im Gewächshaus für vier Wochen kultiviert (Kapitel C 2.2.1), bis sie den Blattläusen in der Klimakammer zur Verfügung gestellt werden konnten. Für die in vitro und in vivo Versuche wurden, wie nach Akca et al. (2015), sechs bis acht Tage alte adulte Blattläuse verwendet.

2.2.3 In vitro Versuchsdurchführung

Um die insektizide Wirkung der trocknenden Pflanzenöle L, T und des halbtrocknenden R zu bewerten, wurden in vitro Versuche mit adulten *Aphis fabae* durchgeführt. Die protektive und kurative Wirkung der drei Pflanzenöle wurde im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K) getestet. Die Herstellung der Öle erfolgte nach der Beschreibung in Kapitel A 2.1.2. Für die insektizide Wirkung der Pflanzenöle gegenüber den Blattläusen wurden jeweils Ölkonzentrationen von 2% verwendet. Für die in vitro Versuche wurden 28 Blattscheiben von vier Wochen alten Ackerbohnen mit einem Korkbohrer ($\varnothing = 2,3 \text{ cm}$) ausgestanzt. Die Blattscheiben wurden in zwei Gruppen eingeteilt, für die protektive und kurative Behandlung. Die Applikation der Pflanzenöle wurde einmalig mit Handsprühern auf der abaxialen und adaxialen Seite der Blattscheiben durchgeführt, bis sie komplett benetzt waren. Das Applikationsschema für die Untersuchungen der Blattläuse ist in Tabelle 11 beschrieben. Um die protektive Wirkung zu bewerten, wurde die erste Gruppe von Blattscheiben mit den Pflanzenölen behandelt, kurz bevor fünf adulte Blattläuse auf jede von ihnen gesetzt wurden. Die kurative Wirkung wurde bei der zweiten Gruppe durch Applikation der Pflanzenöle unmittelbar nach dem Aufsetzen der fünf adulten Blattläuse auf die Blattscheiben getestet. Die Blattläuse wurden jeweils nach dem Verfahren von Akca et al. (2015) mit einem feinen Pinsel auf die Unterseiten der Blattscheiben übertragen. Für das Aufsetzen wurde pro Öl-Variante jeweils ein feiner Pinsel verwendet.

Tabelle 11: Behandlungen und Beschreibung der zeitlichen Abfolge der Öl-Applikation und Platzierung der Blattläuse auf den Blattscheiben der Ackerbohnen für die Untersuchungen zur insektiziden Wirkung der Öle gegenüber *Aphis fabae*.

Behandlung	Zeitliche Abfolge
protektiv (erste Gruppe)	1. Blattschreiben mit Ölen behandeln 2. Blattläuse auf behandelte Blattscheiben aufsetzen
kurativ (zweite Gruppe)	1. Blattläuse auf unbehandelte Blattscheiben aufsetzen 2. Blattscheiben + Blattläuse mit Ölen behandeln

Mit Ölen behandelte Blattscheiben wurden anschließend mit der abaxialen Seite nach oben auf feuchtes Filterpapier jeweils einzeln in Petrischalen ($\varnothing = 3,4$ cm, Höhe = 1,0 cm) gelegt und verschlossen. Die Deckel der Petrischalen wurden vorab mit einem Loch ($\varnothing = 1,0$ cm) versehen und mit Gaze beklebt. Das befeuchtete Filterpapier diente dazu, das Austrocknen der Blattscheiben zu verzögern. Als Kontrolle wurden zusätzlich unbehandelte Blattscheiben mit jeweils fünf adulten Blattläusen eingesetzt, die ebenfalls in Petrischalen platziert wurden. Alle Petrischalen wurden in einer Klimakammer unter denselben kontrollierten Bedingungen, die für die Aufzucht der Läuse eingestellt wurden (Kapitel C 2.2.2), aufgestellt. Die *in vitro* Versuche wurden in einem randomisierten Design in vierfacher Wiederholung pro Variante durchgeführt. Daraus ergaben sich insgesamt 28 Petrischalen mit jeweils einer Blattscheibe und fünf adulten Blattläusen.

2.2.4 In vivo Versuchsdurchführung

In einem anschließenden *in vivo* Versuch wurde nur die kurative Wirkung der beiden trocknenden Öle L und T im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K) getestet. Der Versuch wurde mit adulten *Aphis fabae* auf vier Wochen alten Ackerbohnen durchgeführt. Mit Ausnahme der jüngsten beiden voll entwickelten Blattspreiten wurden alle anderen Blätter entfernt. Auf zwölf Ackerbohnen, vier pro Variante, wurden jeweils zehn adulte Blattläuse mit einem Pinsel aufgesetzt. Damit die Läuse sich auf den Pflanzen etablieren konnten, wurde die Ölbehandlung erst nach 24 h durchgeführt. Um den Zuflug anderer Insekten und den Abgang der Läuse bis zur Behandlung zu verhindern, wurde jede Pflanze auf eine Schale gestellt und mit einem transparenten Zylinder abgedeckt. Der Zylinder wurde zuvor mit Gaze abgedichtet (Abbildung 28a). Außerdem wurde das Substrat in den Töpfen mit einer Scheibe aus weißem Papier abgedeckt, um eventuell herunterfallende Läuse oder spätere Exuvien zu erkennen (Abbildung 28b). Alle Zylinder mit Pflanzen wurden bis zur Behandlung unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus aufgestellt.

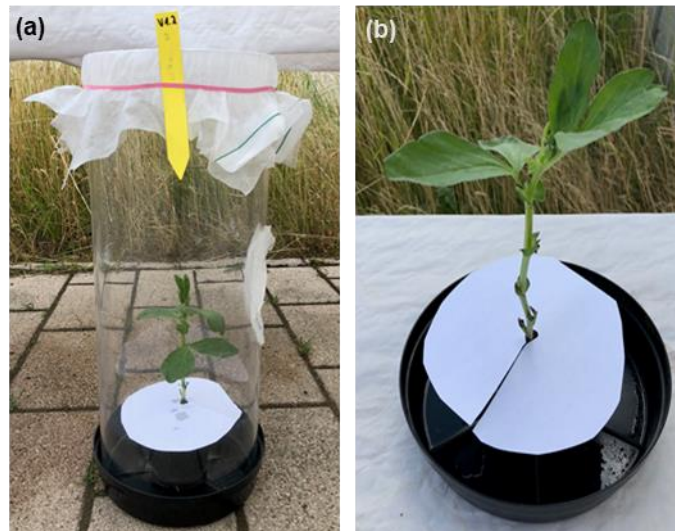


Abbildung 28: Beispielhafte Darstellung des in vivo Versuchs mit adulten *Aphis fabae*. (a) Ackerbohne unter transparentem Zylinder; (b) Ackerbohne in Schale mit Papierscheibe zur Abdeckung der Erde für die Auszählung.

Unmittelbar vor der Behandlung mit den Pflanzenölen wurde zunächst die Anzahl der neugeborenen Nymphen und der adulten Blattläuse auf jeder Ackerbohne festgehalten. Anschließend erfolgte die Applikation der Pflanzenöle einmalig mit Handsprühern auf der abaxialen und adaxialen Seite der Blätter, bis sie gleichmäßig benetzt waren. Als Kontrollgruppe dienten unbehandelte Pflanzen auf denen vorab ebenfalls jeweils zehn adulte Blattläuse platziert wurden. Bis zur erneuten Auszählung nach weiteren 24 h wurden alle Ackerbohnen wieder einzeln unter transparenten Zylindern (Abbildung 28a) platziert und unter kontrollierten Bedingungen im Gewächsaus aufgestellt.

2.2.5 Bewertung der Fekundität und Mortalität von *Aphis fabae*

Für die anschließende Bewertung der in vitro Versuche erfolgte eine Zählung neugeborener Nymphen und adulter Blattläuse auf jeder Blattscheibe zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten. Die erste Zählung erfolgte nach 24 h und eine erneute Auszählung nach 48 h, wobei unterschieden wurde, ob Nymphen und Adulte jeweils lebendig oder gestorben waren.

Für die Bewertung der in vivo Versuche erfolgte eine Auszählung der neugeborenen Nymphen und Adulten nach 48 h. Auch hierbei wurde erfasst, ob die gezählten Individuen lebendig oder gestorben waren.

Für die Bestimmung der Fekundität der Läuse wurde die Anzahl der neugeborenen Nymphen nach 24 h gezählt und in Bezug zur Startpopulation adulter Blattläuse berechnet. Nach 48 h wurde die Fekundität erneut ermittelt, indem Bezug genommen wurde zur Anzahl noch lebender adulter Blattläuse nach 24 h.

Für die Bestimmung der Mortalität wurde die Anzahl der toten Individuen sowohl nach 24 h und 48 h in Bezug auf die Anzahl aller Individuen zum jeweiligen Zeitpunkt berechnet,

unabhängig davon ob diese lebend oder tot waren. Die Bewertung der Mortalität wurde für Nymphen und Adulte separat durchgeführt.

2.3 Statistische Auswertung

In den Liniendiagrammen (Abbildungen 29 und 30) sind die Daten der oben aufgeführten Versuche als Mittelwert, in allen Säulendiagrammen (Abbildungen 31-34) zusätzlich auch die Standardabweichungen (+SD) dargestellt. Die Anzahl der Wiederholungen (n) ist jeweils unter den Abbildungen mit angegeben oder es wird an entsprechender Stelle auf eine Tabelle verwiesen. Die Varianzanalyse (ANOVA) wurde verwendet, um die Mittelwerte der Behandlungen zu vergleichen. Bei gegebener Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test) und Homoskedastizität (Levene-Test) wurde ein Tukey-HSD-Test als Post-hoc-Verfahren zur Bestimmung homogener Untergruppen bei einem p-Wert von $p \leq 0,05$ verwendet. Daten, die nicht der Homogenität der Varianz oder der Normalverteilung entsprachen, wurden mit dem Games-Howell-Test bei einem p-Wert von $p \leq 0,05$ analysiert. Alle statistischen Analysen wurden mit der Software IBM SPSS 25.0 durchgeführt. Signifikante Unterschiede wurden dabei durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet. Konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, so wurde dies mit nicht signifikant (n.s.) kenntlich gemacht.

3 Ergebnisse

3.1 Insektizide Wirkung der Öle auf die Mortalität von *Leptinotarsa decemlineata*

In Abbildung 29 ist die insektizide Wirkung der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) und des halbtrocknenden Pflanzenöls R im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Mortalität larvaler Kartoffelkäfer nach protektiver (Abbildung 29a) und kurativer Behandlung (Abbildung 29b) an drei Boniturterminen (1, 2 und 3 Tage nach Behandlung) im Rahmen von in vitro Versuchen.

Die protektiven Behandlungen (Abbildung 29a) wiesen an allen drei Boniturterminen keine signifikanten Unterschiede auf (Tabelle 12). Verglichen zu den anderen Pflanzenölen zeigte T an allen drei Terminen keine Wirkung auf die Larven, während sich nach einer Behandlung mit L und R die Mortalität der Larven ab dem zweiten Boniturtermin veränderte. Nach einer protektiven Behandlung mit L lag die Mortalität am zweiten und dritten Tag nach Behandlung bei 4,2%. Nach protektiver Behandlung mit R konnte am zweiten Tag eine Mortalität der Larven von 20,8% und am dritten Tag von 25,0% beobachtet werden.

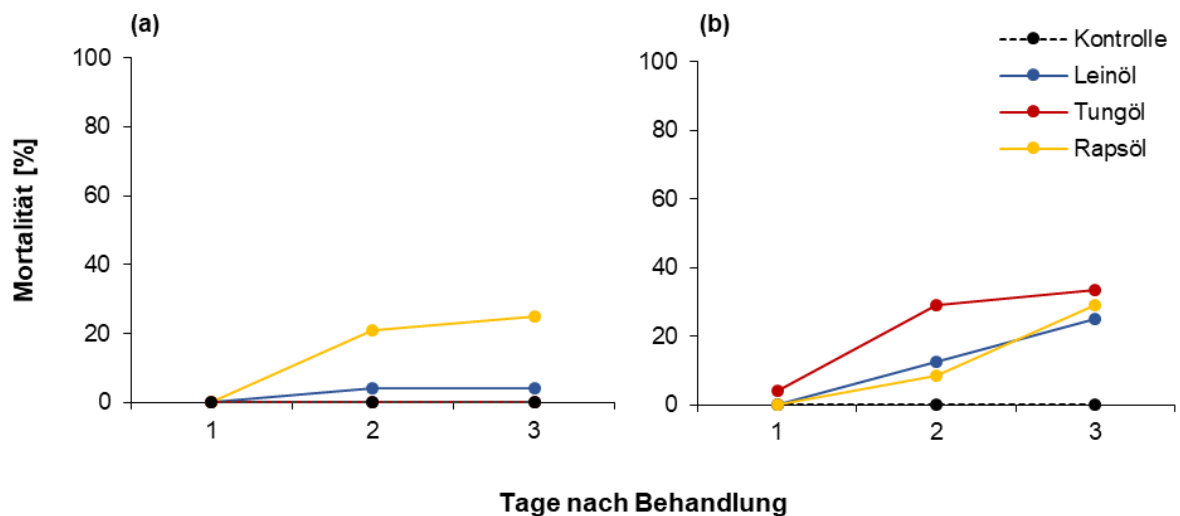


Abbildung 29: Mortalität larvaler Kartoffelkäfer. Zählung der toten Kartoffelkäferlarven im zeitlichen Verlauf von 3 Boniturtagen nach (a) protektiver und (b) kurativer Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (schwarz-weiß gestrichelt); hUg bei $p < 0,05$ nach Tukey-HSD-Test in Tabelle 12, $n = 4$; (SD in Tabelle 34 im Anhang).

Bei der kurativen Behandlung (Abbildung 29b) konnten am zweiten Boniturtermin signifikante Unterschiede zwischen K und T und am dritten Boniturtermin signifikante Unterschiede zwischen K und den Ölen R und T ermittelt werden (Tabelle 12). Nach einer kurativen Behandlung mit T betrug die Mortalität der Larven am ersten Tag nach Behandlung 4,2%, am zweiten Tag 29,2% und am dritten Tag 33,3%. Verglichen zu den anderen beiden Pflanzenölen verursachte T an allen drei Boniturterminen die höchste Mortalität der Larven. L

und R wirkten sich an allen drei Boniturterminen ähnlich auf die Mortalität der Larven aus und lagen nach 3 Tagen bei 25,0% (L) und 29,2% (R).

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass alle Ölbehandlungen im Vergleich zur Kontrolle nach kurativer Behandlung zu einer erhöhten Mortalität larvaler Kartoffelkäfer führten.

Tabelle 12: Homogene Untergruppen zugehörig zum Versuch der Mortalität larvaler Kartoffelkäfer (Abbildung 29) (Statistik: ANOVA, $p \leq 0,05$, Tukey-HSD-Test) bezogen auf den jeweiligen Messtermin; statistisch signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten dargestellt durch unterschiedliche Buchstaben; **n.s.** = nicht signifikant.

Variante	protektiv			kurative		
	Tage nach Behandlung			Tage nach Behandlung		
	1	2	3	1	2	3
Kontrolle	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	b	b
Rapsöl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	ab	a
Leinöl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	ab	ab
Tungöl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	a	a

In Abbildung 30 ist die insektizide Wirkung der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) und des halbtrocknenden Pflanzenöls R im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (K) dargestellt. Abgebildet ist die Mortalität adulter Kartoffelkäfer nach protektiver (Abbildung 30a) und kurativer Behandlung (Abbildung 30b) an vier Boniturterminen (1, 2, 3 und 6 Tage nach Behandlung) im Rahmen von in vitro Versuchen.

Die protektiven Behandlungen wiesen an allen vier Boniturterminen keine signifikanten Unterschiede auf (n.s.). Verglichen zu den anderen Pflanzenölen zeigte L an allen vier Terminen keine Wirkung auf die adulten Kartoffelkäfer, während sich nach einer Behandlung mit T und R die Mortalität der Käfer ab dem dritten Boniturtermin veränderte. Nach einer protektiven Behandlung mit T lag somit die Mortalität am sechsten Tag nach Behandlung bei 25,0%. Nach protektiver Behandlung mit R konnte am sechsten Tag eine Mortalität der adulten Kartoffelkäfer von 31,3% beobachtet werden.

Die kurativen Behandlungen wiesen ebenfalls an allen vier Boniturterminen keine signifikanten Unterschiede auf (n.s.). Nach einer kurativen Behandlung mit T betrug die Mortalität der adulten Kartoffelkäfer am ersten und zweiten Tag nach Behandlung 12,5%, am dritten Tag 25,0% und am sechsten Tag 50,0%. Verglichen zu den anderen beiden Pflanzenölen verursachte T an allen vier Boniturterminen die höchste Mortalität der adulten Kartoffelkäfer. L und R wirkten sich an den ersten drei Boniturterminen gleich auf die Mortalität der Käfer aus und lagen nach sechs Tagen bei 12,5% (L) und 25,0% (R).

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass alle Ölbehandlungen im Vergleich zur Kontrolle nach kurativer Behandlung zu einer erhöhten Mortalität adulter Kartoffelkäfer führten.

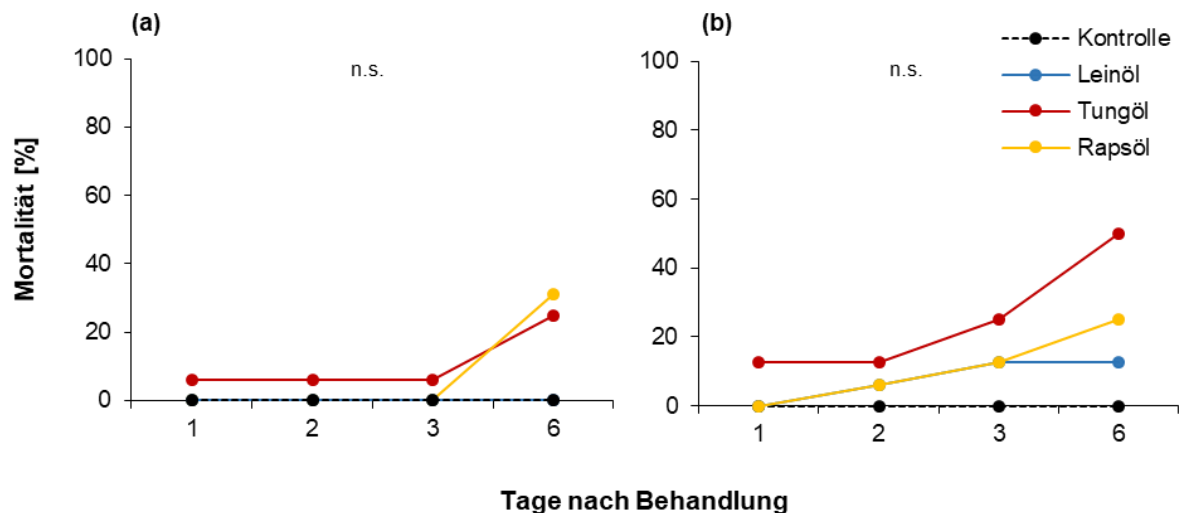


Abbildung 30: Mortalität adulter Kartoffelkäfer. Zählung der toten Kartoffelkäfer im zeitlichen Verlauf von 6 Boniturtagen nach **(a)** protektiver und **(b)** kurativer Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (schwarz-weiß gestrichelt), hUg bei $p < 0,05$ nach Tukey-HSD-Test: n.s. = nicht signifikant, $n = 4$, (SD in Tabelle 35 im Anhang).

3.2 Insektizide Wirkung der Öle gegenüber *Aphis fabae*

Die in vitro Versuche mit *Aphis fabae* wurden mehrfach unter den gleichen kontrollierten Versuchsbedingungen durchgeführt. Im Folgenden sind exemplarische Ergebnisse dargestellt, da alle Versuchswiederholungen vergleichbare Ergebnisse erzielten. Für die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden exemplarisch zwei Versuchswiederholungen gemeinsam ausgewertet.

3.2.1 Insektizide Wirkung der Öle auf die Fekundität von *Aphis fabae*

In Abbildung 31 ist die protektive und kurative insektizide Wirkung der einzelnen trocknenden Öle (L, T) und des halbtrocknenden R hinsichtlich der Fekundität von *Aphis fabae* dargestellt. Die Ergebnisse sind im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle im Rahmen von in vitro Versuchen aufgeführt. Abgebildet ist die Anzahl neugeborener Nymphen 24 h (Abbildung 31a) und 48 h (Abbildung 31b) nach Behandlung. Die Bewertung der Fekundität ist in Kapitel C 2.2.5 erläutert.

Unabhängig vom Applikationszeitpunkt gab es nach 24 h in der Kontrolle signifikant mehr neugeborene Nymphen als in den Pflanzenöl-Varianten (Abbildung 31a). Darüber hinaus lag 24 h nach protektiver Ölbehandlung die Anzahl neugeborener Nymphen zwischen 0,6 (T) und 0,9 (R) und nach kurativer Behandlung zwischen 0,5 (L) und 0,8 (T) (Abbildung 31a). Die Pflanzenöle zeigten nach 24 h keine signifikanten Unterschiede untereinander, aber in den Varianten L und R wurden von der Anzahl her weniger Nymphen nach kurativer Behandlung geboren, als nach protektiver Behandlung. Mit einem Mittelwert von 2,2 Nymphen pro adulter Blattlaus wurden in der Kontrolle mehr als doppelt so viele Nymphen geboren als in den

Pflanzenöl-Varianten. Die Anzahl neugeborener Nymphen lag nach 48 h (Abbildung 31b) bei allen Varianten höher im Vergleich zur Anzahl neugeborener Nymphen 24 h nach Behandlung. 48 h nach protektiver Behandlung lag die Anzahl der neugeborenen Nymphen zwischen 2,2 (R) und 2,3 (L) und nach kurativer Behandlung zwischen 2,0 (T) und 2,7 (L). Die Pflanzenöle zeigten nach 48 h keine signifikanten Unterschiede untereinander, aber in den Varianten T und R wurden von der Anzahl her weniger Nymphen nach kurativer Behandlung geboren, als nach protektiver Behandlung. In der Kontrolle konnte ein Mittelwert von 4,6 Nymphen pro adulte Blattlaus beobachtet werden, signifikant mehr neugeborene Nymphen als nach den Behandlungen mit R und der kurativen Behandlung mit T.

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass alle Ölbehandlungen im Vergleich zur Kontrolle zu einer Reduktion neugeborener Nymphen nach 24 h und 48 h führten. Insgesamt war nach allen protektiv und kurativ applizierten Pflanzenölen ein Anstieg in der Anzahl neugeborener Nymphen zwischen den Zeitpunkten 24 h (Abbildung 31a) und 48 h (Abbildung 31b) nach Behandlung zu verzeichnen.

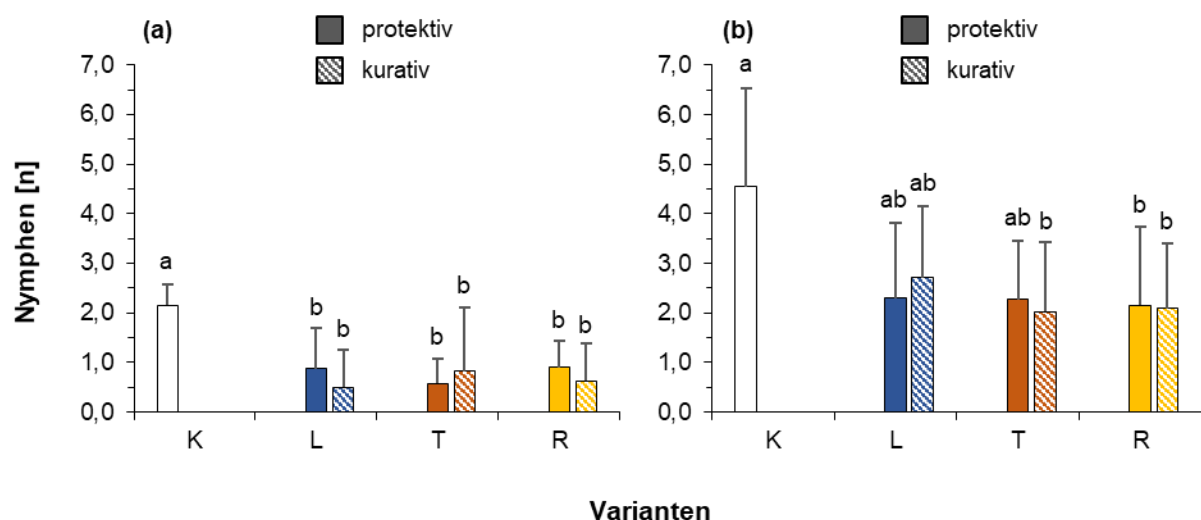


Abbildung 31: Anzahl neugeborener Nymphen pro behandelte adulte Blattlaus, Zählung der neugeborenen Nymphen nach 24 h (a) und erneute Zählung nach 48 h (b) nach Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), protektiv behandelte Blattscheiben werden durch ausgefüllte Säulen und kurativ behandelte Blattscheiben durch gestrichelte Säulen dargestellt, unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, $n = 8$, +SD.

3.2.2 Insektizide Wirkung der Öle auf die Mortalität von *Aphis fabae*

In Abbildung 32 ist die protektive und kurative insektizide Wirkung der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) und des halbtrocknenden Pflanzenöls R im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle dargestellt. Dargestellt ist deren insektizide Wirkung hinsichtlich der Mortalität von adulten *Aphis fabae* im Rahmen von in vitro Versuchen. Abgebildet ist der Anteil

toter adulter Blattläuse nach 24 h (Abbildung 32a) und 48 h (Abbildung 32b) nach Behandlung. Die Bewertung der Mortalität ist in Kapitel C 2.2.5 erläutert.

24 h nach protektiver Ölbehandlung lag die Mortalität adulter Blattläuse zwischen 7,5% (L) und 27,5% (R) und nach kurativer Behandlung zwischen 15,0% (T) und 37,5% (R) (Abbildung 32a). Die kurative eingesetzte R-Variante zeigte nach 24 h signifikante Unterschiede im Vergleich zur protektiv eingesetzten L-Variante und zur Kontrolle. Für alle weiteren Varianten konnten hingegen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, unabhängig vom Applikationszeitpunkt. Zudem zeigte eine kurative Behandlung mit L (22,5%) eine dreimal höhere Mortalität adulter Blattläuse als eine protektive Behandlung mit L (7,5%). Die Mortalität adulter Blattläuse lag 48 h (Abbildung 32b) nach protektiver Behandlung zwischen 32,5% (L) und 47,5% (R) und nach kurativer Behandlung zwischen 40,0% (L) und 57,5% (R). Die Mortalität nach 48 h, hervorgerufen durch die Pflanzenöl-Behandlungen, ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen protektiver Applikation, kurativer Applikation oder der Kontrolle.

Im Allgemeinen konnte beobachtet werden, dass insbesondere nach 48 h, vor allem durch die kurativ applizierten Pflanzenöle im direkten Vergleich zu den jeweils protektiv applizierten Varianten, höhere Mortalitäten hervorgerufen wurden.

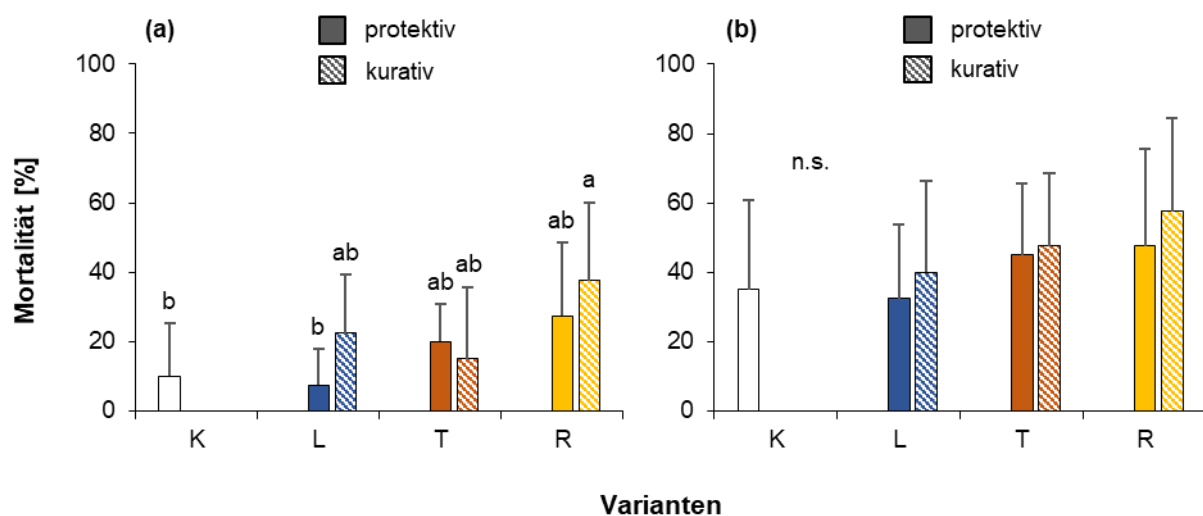


Abbildung 32: Mortalität adulter *Aphis fabae*. Zählung der toten adulten Blattläuse nach 24 h **(a)** und erneute Zählung nach 48 h **(b)** nach Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), protektiv behandelte Blattscheiben werden durch ausgefüllte Säulen und kurativ behandelte Blattscheiben durch gestrichelte Säulen dargestellt, unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, n.s. = nicht signifikant, $n = 8$, +SD.

In Abbildung 33 ist die protektive und kurative insektizide Wirkung der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) und des halbtrocknenden Pflanzenöls R im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle im Rahmen von in vitro Versuchen dargestellt. Dargestellt ist im

Gegensatz zu Abbildung 32 deren insektizide Wirkung hinsichtlich der Mortalität von Nymphen von behandelten adulten *Aphis fabae*. Abgebildet ist die Anzahl toter Nymphen nach 24 h (Abbildung 33a) und 48 h (Abbildung 33b) nach Behandlung. Die Bewertung der Mortalität ist in Kapitel C 2.2.5 erläutert.

24 h nach protektiver Behandlung lag die Mortalität der Nymphen zwischen 1,4% (L) und 6,3% (R) und nach kurativer Behandlung zwischen 0,0% (T, R) und 10,4% (L) (Abbildung 33a). Nach 48 h lag die Mortalität der Nymphen nach protektiver Behandlung zwischen 11,0% (T) und 25,1% (L) und nach kurativer Behandlung lag die Mortalität zwischen 11,2% (L) und 22,6% (T) (Abbildung 33b).

Im Allgemeinen stieg die Mortalität vom Zeitpunkt 24 h nach kurativer Behandlung bis 48 h nach kurativer Behandlung für R um 20,2% und für T um 22,6%. Im Gegensatz dazu stieg über denselben Zeitraum die Mortalität nach kurativer Behandlung mit L nur um 0,8%. Die in Abbildung 33 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die durch die Pflanzenöle verursachte Mortalität der Nymphen keine signifikanten Unterschiede zwischen der protektiven und kurativen Anwendungszeit zeigten, unabhängig davon, ob die Anzahl der toten Nymphen nach 24 h oder 48 h ermittelt wurde.

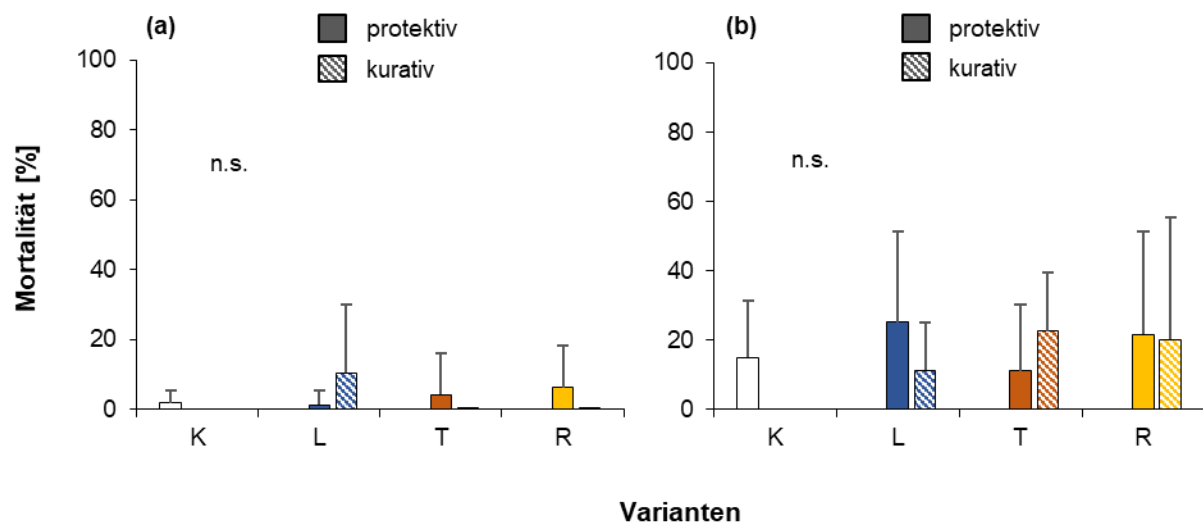


Abbildung 33: Mortalität von Nymphen von *Aphis fabae*. Zählung der toten Nymphen nach 24 h **(a)** und erneute Zählung nach 48 h **(b)** nach Behandlung mit Leinöl (blau), Tungöl (rot) und Rapsöl (gelb) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), protektiv behandelte Blattscheiben werden durch ausgefüllte Säulen und kurativ behandelte Blattscheiben durch gestrichelte Säulen dargestellt, unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, n.s. = nicht signifikant, $n = 8$, +SD.

Zusätzlich zu den in vitro Versuchen wurden in vivo Versuche mit *Aphis fabae* ebenfalls mehrfach unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Im Folgenden sind exemplarische Ergebnisse dargestellt, da alle Versuchswiederholungen vergleichbare

Ergebnisse erzielten. Für die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden exemplarisch zwei Versuchswiederholungen gemeinsam ausgewertet.

In Abbildung 34 ist die kurative insektizide Wirkung der zwei trocknenden Pflanzenöle (L, T) im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle im Rahmen von in vivo Versuchen dargestellt. Abgebildet ist deren insektizide Wirkung hinsichtlich der Mortalität von Nymphen (Abbildung 34a) und adulten Blattläusen (Abbildung 34b) von *Aphis fabae*. Die Anzahl toter Nymphen und toter Adulter wurde 48 h nach Behandlung im Rahmen von in vivo Versuchen bestimmt. Die Bewertung der Mortalität ist in Kapitel C 2.2.5 erläutert.

Nach 48 h lag die Mortalität der Nymphen zwischen 1,8% (T) und 10,9% (L) (Abbildung 34a). Die Mortalität der Nymphen war nach einer kurativen Behandlung mit L signifikant höher als nach einer kurativen Behandlung mit T oder der Kontrolle. Die Mortalität der adulten Blattläuse lag nach kurativer Behandlung hingegen zwischen 3,6% (K) und 12,8% (L) und zeigte keine signifikanten Unterschiede (Abbildung 34b).

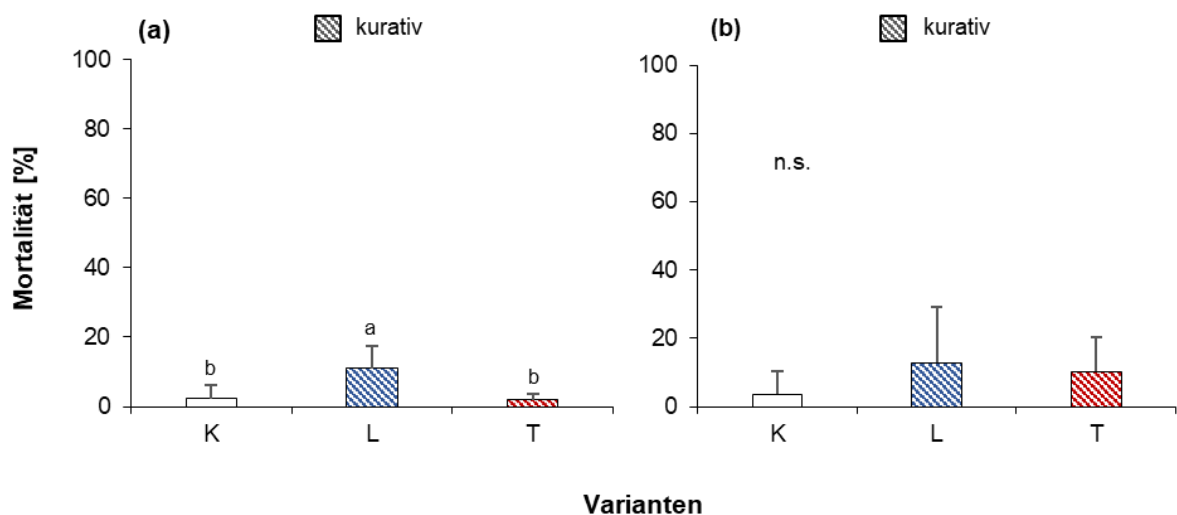


Abbildung 34: Mortalität von **Nymphen von *Aphis fabae* (a)** und **adulten *Aphis fabae* (b)** jeweils 48 h nach **kurativer Behandlung** mit Leinöl (blau) und Tungöl (rot) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (weiß), unterschiedliche Buchstaben über den Säulen kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$ nach Games-Howell-Test, **n.s.** = nicht signifikant, $n = 8$, +SD.

4 Diskussion

Wie bereits in Kapitel C 1.3 beschrieben, wird trocknenden Pflanzenölen seit einiger Zeit eine insektizide Wirkung gegenüber verschiedenen Schädlingen zugeschrieben. Aufgrund dieser beschriebenen Erkenntnisse von Pflanzenölen gegenüber Schädlingen und der bisher bekannten Wirkung von trocknenden Pflanzenölen, ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit eine insektizide Wirkung dieser Pflanzenöle gegenüber Schädlingen, unter kontrollierten Bedingungen, zu zeigen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Wirkung der trocknenden Pflanzenöle auf Schädlinge von der Konzentration und vom Applikationszeitpunkt abhängt. Zudem wurde die Hypothese aufgestellt, dass die trocknenden Pflanzenöle vor allem die Mortalität und Fekundität von Schädlingen beeinflusst.

In den hier dargestellten Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Konzentration von 2% der Pflanzenöle (L, T und R) zu einer geringeren Fekundität adulter Blattläuse nach 24 h (Abbildung 31a) und nach 48 h (Abbildung 31b) im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle führte. Im Vergleich zur Kontrolle resultierten nach 24 h alle Ölbehandlungen zu einer signifikant niedrigeren Fekundität (Abbildung 31a). Nach 48 h hingegen führten nur kurativ appliziertes Tungöl und Rapsöl zu signifikant weniger neugeborenen Nymphen (Abbildung 31b).

Es wurde bereits allgemein beschrieben, dass eine insektizide Wirkung mit einer verringerten Fekundität einhergeht. Dies konnte z.B. für das Insektizid „Spirodiclofen“ (Marčić, 2007), für Mineralöle (Cen et al., 2002) oder Neem-Formulierungen wie „Neem-Azal S“ oder „Margosan-O“ (Dimetry & Schmidt, 1992) gezeigt werden. Marčić (2007) zeigte, dass Fekundität und Fertilität von Spinnmilben durch hohe Konzentrationen von „Spirodiclofen“ signifikant abnahmen. Cen et al. (2002) stellten zudem fest, dass mit Mineralölen behandelte Blätter die Lebensdauer, die Fekundität und die Präovipositionszeit von adulten Roten Spinnmilben signifikant reduzierten. Des Weiteren fanden Dimetry und Schmidt (1992) heraus, dass Fekundität und Lebensdauer von adulten *Aphis fabae* signifikant reduziert werden konnten, wenn diese auf mit „Neem-Azal S“ oder „Margosan-O“ behandelten Bohnenpflanzen platziert wurden. Die hier beschriebenen Erkenntnisse aus der Literatur unterstützen die Hypothese, dass auch die in dieser Arbeit getesteten Pflanzenöle einen Einfluss auf die Fekundität von Schädlingen haben, denn die in Kapitel C 3.2.1 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Fekundität der Schädlinge durch die eingesetzten trocknenden und halbtrocknenden Pflanzenöle reduziert werden konnte.

In den Versuchsreihen zur Mortalität der Blattläuse (Abbildung 32-34) konnte gezeigt werden, dass das kurativ applizierte R nach 24 h signifikant mehr tote adulte Blattläuse im Vergleich zum protektiv applizierten L und der Kontrolle (Abbildung 32a) aufwies. Nach 48 h konnte hingegen kein signifikanter Unterschied mehr festgestellt werden (Abbildung 32b), dennoch konnten Mortalitäten bis zu 57,5% nach einer kurativen Rapsölbehandlung erreicht werden. In den in vitro-Versuchen zur Mortalität der Nymphen konnten zu keinem Zeitpunkt nach

Applikation signifikante Unterschiede zwischen den Ölbehandlungen und der Kontrolle festgestellt werden (Abbildung 33).

Die in Abbildung 32 dargestellten Ergebnisse zeigen, wie bereits erwähnt, dass 48 h nach einer kurativen Rapsölbehandlung eine Mortalität adulter Blattläuse von 57,5% erreicht werden konnte (Abbildung 32b). Diese Ergebnisse zur kurativen Rapsölbehandlung stehen im Einklang mit Untersuchungen von Martín López et al. (2003). Martín López et al. (2003) zeigten in ihren Versuchen mit Rapsöl gegen *Myzus persicae*, dass bereits nach 12 h 78,5% und nach 36 h 89,4% der behandelten Schädlinge, durch den Einsatz einer einprozentigen Ölkonzentration, starben. Darüber hinaus zeigte auch Jaastad (2007) in seinen Versuchen eine Mortalität von 89% von *Myzus cerasi* nach einer Applikation mit Rapsöl. Und auch Marčić et al. (2009) erzielten in einem Gewächshausversuch mit einer zweiprozentigen Rapsölkonzentration eine Wirksamkeit von 86,9% gegen *Myzus persicae*. Beattie et al. (2002) konnten infolge einer Mehrfachbehandlung mit Rapsöl eine insektizide Wirkung gegen die Zitrusminiermotte (*Phyllocnistis citrella*) zeigen, indem die Anzahl an Individuen reduziert werden konnte. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass in vielen Studien, einschließlich der in Kapitel C 1.3 dargestellten Untersuchungen, eine Wirksamkeit gegen verschiedene Schädlinge unter Verwendung eines halbtrocknenden Rapsöls erreicht werden konnte. Rapsöl kann als Insektizid eingesetzt werden, wobei die insektizide Wirkung auf einem dünnen Ölfilm beruht, der die Schädlinge überzieht und sie und ihre Eier erstickt. Rapsöl hat sich dabei vor allem als besonders wirksam gegen beißende und saugende Schädlinge erwiesen (Roth & Kormann, 2005; Zunker & Schneller, 2014a).

Diese Erkenntnisse spiegeln auch die Ergebnisse der hier dargestellten Versuche mit *Leptinotarsa decemlineata* wieder. Auch hier führten Behandlungen mit einem halbtrocknenden Rapsöl sowohl bei Larven als auch bei adulten Kartoffelkäfern, vor allem nach einer kurativen Applikation, zu erhöhten Mortalitäten (Abbildung 29b & 30b). Insgesamt kann also festgehalten werden, dass mit Blick auf die Mortalität eine kurative Applikation effektiver ist als eine protektive Behandlung. Diese Erkenntnis stützen sowohl die hier dargestellten Ergebnisse als auch die Ergebnisse der zitierten Studien, bei denen meist erst nach Befall eine entsprechende Wirksamkeit durch den Einsatz der entsprechenden Pflanzenöle erzielt werden konnte.

Darüber hinaus wurde in den hier vorgestellten Ergebnissen 48 h nach einer kurativen Leinölbehandlung eine Mortalität adulter Blattläuse von 40,0% erreicht (Abbildung 32b). Diese Ergebnisse stehen tendenziell im Einklang mit Untersuchungen von beispielsweise Rajput et al. (2017). Rajput et al. (2017) zeigten in ihrer Studie, dass durch den Einsatz von Leinöl eine Wirksamkeit von 55,2% im Hinblick auf die Mortalität einer Population von Weißer Fliege gezeigt werden konnte. Jedoch war die Wirksamkeit des Leinöls in dieser Studie im Durchschnitt niedriger als die von anderen Produkten wie etwa Niemöl (63,3%) oder

Baumwollsaamenöl (62,0%). Bereits im Jahr 1918 wiesen Scott et al. eine 94 prozentige Mortalität nach einer Behandlung mit Leinöl gegenüber Bettwanzen (*Cimex lectularius*) auf. Allerdings lassen sich hierbei keine Informationen zur Ölkonzentration finden. Auch Fleming und Baker (1934) wiesen bei einer Konzentration von ca. 5% rohem Leinöl pro Liter Wasser eine Mortalitätsrate von 95,8% auf den Japankäfer (*Popillia japonica*) nach. Darüber hinaus zeigte auch Brendel (2013), dass Leinöl in Mischung mit Orangenöl die Anzahl von *Aulacaspis rosae* Larven nach einer kurativen Anwendung signifikant reduzierte. Sie vermutete, dass die trocknenden und härtenden Eigenschaften des Leinöls die Schädlinge versiegelten, sodass sie sich nicht weiter entwickeln konnten und starben. Die mehrfach ungesättigte Fettsäure Linolensäure, als hoher Bestandteil des Leinöls, hat aufgrund ihrer Eigenschaften die Fähigkeit zu einer ausgehärteten wasserdichten Schicht zu trocknen (Roth & Kormann, 2000; Roth & Kormann, 2005). Diese Schlussfolgerung unterstützt die Ergebnisse dieser Arbeit, denn im Rahmen der hier dargestellten Versuche konnten ebenfalls im Vergleich zum Rapsöl und Tungöl höhere Mortalitäten von Nymphen und adulten Blattläusen nach einer jeweils kurativen Leinöl-Behandlung beobachtet werden (Abbildung 33 & 34a). Die höheren Mortalitätsraten der zitierten Studien lassen sich möglicherweise zum einen durch höhere Ölkonzentrationen und unterschiedliche Herstellungsprozesse der Öle, zum anderen durch Behandlungswiederholungen, Behandlungszeitpunkte und auch durch die Art der Behandlung (z.B. einsprühen, einpinseln) erklären.

Auch für die α -Elaeostearinsäure und Erythro-9,10-Dihydroxy-1-octadecanol-Acetat als Bestandteile des Tungöls konnte bereits im Jahr 1981 gezeigt werden, dass sie für die abschreckende Wirkung in Fütterungsversuchen mit adulten Baumwollkapselkäfern verantwortlich waren, indem Pflanzen mit Tungöl behandelt wurden (Jacobson et al., 1981). Neben der abschreckenden Wirkung des Tungöls (Jacobson et al., 1981) können Schadinsekten auch durch den Kontakt mit Pflanzenölen abgetötet werden (Zunker & Schneller, 2014a; Zunker & Schneller, 2014b). Beide Effekte konnten vor allem im Rahmen der Versuche mit Kartoffelkäfern (Abbildung 29 & 30) beobachtet werden. Die protektiv mit Tungöl behandelten Kartoffelpflanzen führten bei den adulten Kartoffelkäfern nach sechs Tagen zu einer Mortalität von 25,0%, was auf der einen Seite auf eine abschreckende Wirkung des Tungöls hindeutet. Auf der anderen Seite konnte auch nach kurativer Behandlung ein Effekt durch den Kontakt mit dem Tungöl gezeigt werden. Nach kurativer Behandlung lag die Mortalität sechs Tage nach der Behandlung bei 50,0%. Auch im Rahmen der Versuche mit *Aphis fabae* konnte durch das kurativ applizierte Tungöl eine Mortalität vor allem bei adulten Blattläusen gezeigt werden (Abbildung 32 & 34b). Darüber hinaus lässt sich durch diese beobachtete Mortalität auch eine geringere Fekundität der Blattläuse nach 24 h und 48 h erklären (Abbildung 31).

Nach Zunker & Schneller (2014b) können alle Entwicklungsstadien von Schadinsekten bei Kontakt mit Pflanzenölen abgetötet werden, was sich in der bereits vorgestellten Wirkungsweise der Öle, wenn diese vor allem kurativ eingesetzt werden, widerspiegelt. Dabei wirken sich nach Hale et al. (2009) sämtliche Pflanzenschutzmaßnahmen tendenziell stärker auf die Larven aus, wenn diese noch jung und somit möglichst klein sind. Denn je kleiner die Larven sind, umso kleiner ist deren Oberfläche, die vollständig benetzt werden muss. Vincent et al. (2002) führten außerdem auf, dass eine insektizide Wirkung von Ölen vor allem bei Arthropoden mit einem weichen Körper erzielt werden kann. Insgesamt haben die hier dargestellten Ergebnisse grundsätzlich gezeigt, dass vor allem durch einen kurativen Einsatz des trocknenden Lein- und Tungöls und durch das halbtrocknende Rapsöl eine Wirkung gegenüber Nymphen, adulten Blattläusen sowie gegenüber adulten Kartoffelkäfern erzielt werden konnte. Bográn et al. (2006) stellten zudem fest, dass alle Produkte auf Ölbasis, unabhängig von ihrer Herkunft, eine ähnliche Wirkungsweise haben, wenn sie als Insektizid eingesetzt werden. Sie wirken abtötend gegenüber Insekten, indem die Nahrungsaufnahme durch mit Öl bedeckte Oberflächen gestört wird, die Funktion der Zellmembran beeinträchtigt oder die Atmung unterbrochen wird (Bográn et al., 2006). Die insektizide Wirkung beruht demnach auf einem physikalischen und nicht auf einem chemischen Wirkmechanismus, was mit den in dieser Arbeit dargestellten Ergebnissen, vor allem bei der kurativen Anwendung von trocknenden Pflanzenölen, übereinstimmt. Indem gezeigt werden konnte, dass die getesteten trocknenden Pflanzenöle gegen Schädlinge wirken, müssen die zugrundeliegenden Mechanismen allgemeiner Natur sein und von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Öle selbst abhängen. Außerdem scheint es wahrscheinlich, dass die Wirkung der trocknenden Öle darauf beruht, dass sie die Fähigkeit besitzen, einen Film zu bilden.

Insgesamt können die unterschiedlichen Wirkungsgrade in den zitierten Studien im Vergleich zu den hier dargestellten Ergebnissen auf eine unterschiedliche Herstellung der verwendeten Öle zurückzuführen sein. Die Ergebnisse zeigen, wie bereits Ah Chee et al. (2018) berichteten, wie bedeutend die Herstellung und Formulierung von Pflanzenölen für ihre Wirksamkeit gegenüber Schädlingen und auch Krankheitserregern ist. Unter anderem sollten die Ölprodukte mit einem Emulgator versetzt werden, um eine gleichmäßige Verteilung bzw. Suspension der einzelnen Partikel zu ermöglichen (Wurms & Ah Chee, 2018). Für die in dieser Arbeit verwendeten Pflanzenölen kamen, wie in Kapitel A 2.1.2 bereits beschrieben, ebenfalls Emulgatoren zum Einsatz, um entsprechende Öl-in-Wasser-Emulsionen herzustellen. Generell kommt es zudem auf die Konzentration aller Bestandteile der Ölprodukte an, da diese einen möglichen Einfluss auf die Pflanzengesundheit und die Emulsionsstabilität haben können (Wurms & Ah Chee, 2018; Ah Chee et al., 2018).

5 Fazit

Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse von Pflanzenölen gegenüber Schädlingen und der bisher bekannten Wirkung von trocknenden Pflanzenölen wurden vorab die Hypothesen aufgestellt, dass die Wirkung trocknender Pflanzenöle auf Schädlinge von der Konzentration abhängt (**H1**) und, dass diese Wirkung gegenüber Schädlingen vom Applikationszeitpunkt der Öle (**H2**) abhängt. Darüber hinaus wurde die Hypothese formuliert, dass die trocknenden Pflanzenöle vor allem die Mortalität und Fekundität von Schädlingen beeinflussen (**H3**).

Die in Kapitel C 3 dargestellten Ergebnisse geben vor allem Aufschluss über die Wirksamkeit des halbtrocknenden Rapsöls und der trocknenden Pflanzenöle Leinöl und Tungöl gegenüber den Schädlingen *Aphis fabae* und *Leptinotarsa decemlineata*. Es konnte gezeigt werden, dass eine Konzentration von 2% der Pflanzenöle zu einer geringeren Fekundität adulter Blattläuse führte. In den Versuchsreihen zur Mortalität der Blattläuse konnte zudem gezeigt werden, dass vor allem das kurativ applizierte Rapsöl signifikant mehr tote adulte Blattläuse aufwies. Darüber hinaus kam es bei Behandlungen mit Rapsöl zu erhöhten Mortalitäten bei Larven und adulten Kartoffelkäfern, vor allem bei einer kurativen Behandlung mit einer Konzentration von 5%. Außerdem zeigte sowohl eine protektive also auch eine kurative Behandlung mit Tungöl bei adulten Kartoffelkäfern eine hohe Mortalität auf.

Demzufolge kann zusammengefasst werden, dass der Einsatz von trocknenden und halbtrocknenden Pflanzenölen einen Einfluss auf die Mortalität und Fekundität von Schädlingen hat und diese Wirkung vor allem vom Applikationszeitpunkt abhängig ist. Im Hinblick auf die Konzentration lässt sich sagen, dass unterschiedliche Konzentrationen (2% und 5%) jeweils einen Einfluss auf die Schädlinge ausgeübt haben. Bei hohen Konzentrationen sind allerdings zudem phytotoxische Reaktionen (Kapitel A 3.1) zu beachten. Die Wirkung der trocknenden Pflanzenöle lässt sich, vor allem im Hinblick auf die Mortalität, vielmehr durch einen physikalischen als durch einen chemischen Wirkmechanismus erklären. Die hauptsächlich kurative insektizide Wirksamkeit wird durch den direkten Kontakt der Schädlinge mit den trocknenden Pflanzenölen verursacht (Zunker & Schneller, 2014a; Zunker & Schneller, 2014b). Hinzu kommt der Effekt einer abschreckenden Wirkung des Tungöls bei protektiver Behandlung (Jacobson et al., 1981).

Die hier dargestellten Ergebnisse unterstreichen das Potenzial von trocknenden Pflanzenölen als „Biorationals“ für den ökologischen Landbau, da es sich bei diesen glyceridischen Pflanzenölen um nicht-toxische und umweltfreundliche Produkte handelt.

Gesamtfazit und Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen vielversprechende Ansätze, glyceridische Pflanzenöle, wie Leinöl, Tungöl und Rapsöl, als Pflanzenschutzmittel einzusetzen. Aufgrund ihrer Eigenschaften und den hier dargestellten Ergebnissen sind vor allem die Voraussetzungen für einen Einsatz als „Biorationals“ und für einen Einsatz im integrierten Pflanzenschutz gegeben.

Die hohe aufgezeigte Pflanzenverträglichkeit der eingesetzten Pflanzenöle, unter Beachtung der Konzentration, ist dabei eine Grundvoraussetzung für die praktische Anwendung im Bereich Pflanzenschutz. Auch die Tatsache, dass die Öle unter bestimmten Voraussetzungen in regelmäßigen Abständen appliziert werden können, ohne erhebliche phytotoxische Wirkungen hervorzurufen, ist wichtig für einen Einsatz in der Praxis. Viel wichtiger ist jedoch der Sachverhalt, dass die hier eingesetzten Öl-in-Wasser-Emulsionen durch ihren Herstellungsprozess applizierbar bzw. spritzbar waren. Denn eine große Hürde stellt ansonsten bei der Ausbringung von Pflanzenölen eine hohe Viskosität der Öle dar, wodurch es zum Verstopfen der Spritzdüsen kommen kann.

Interessant ist zudem die Tatsache, dass vor allem durch das Tungöl, unter bestimmten Umwelteinflüssen, auch eine Stressreaktion in den Pflanzen hervorgerufen werden konnte. Folglich lässt sich durch diese Ergebnisse auch ein Ansatz für den Einsatz als Herbizid erkennen. Denkbar für eine herbizide Anwendung wäre, zunächst im Rahmen weiterer Versuche, eine Erhöhung der Ölkonzentrationen, oder aber auch die Idee, den Pflanzenölen jeweils weitere Fettsäuren zuzusetzen. Denn viele der hier beschriebenen Ergebnisse lassen sich auf die Fettsäurezusammensetzung des jeweiligen Öls zurückführen. Beispielsweise die mit der Fettsäurezusammensetzung einhergehenden filmbildenden Fähigkeiten der trocknenden Pflanzenöle, stellen eine wichtige Erkenntnis im Rahmen der hier erzielten Ergebnisse dar. So ließ sich in dieser Arbeit durch die Applikation des trocknenden Leinöls, durch eine mögliche Filmbildung des Öls, ein Transpirationsschutz vermuten. Diesen könnte man sich in der Praxis bei hohen biotischen und abiotischen Umwelteinflüssen zu Nutze machen. Allerdings sollten hierzu zunächst umfangreichere Untersuchungen mit anderen Sorten und Kulturen durchgeführt werden.

Aber auch im Rahmen der Untersuchungen zur fungiziden Wirkung der Pflanzenöle ließ sich die gezeigte Wirksamkeit gegenüber *Uromyces appendiculatus* durch die filmbildenden Eigenschaften der trocknenden Öle erklären. So konnte vor allem durch eine protektive Applikation der trocknenden Pflanzenöle eine hohe fungizide Wirkung erzielt werden. Denn ein dünner Film auf der Pflanzenoberfläche kann eine zusätzliche Barriere gegenüber eindringenden Hyphen des Pathogens darstellen, wodurch die Wirt-Parasit-Interaktionen beeinträchtigt werden können. Mit Blick auf die Praxis scheint eine regelmäßige protektive Applikation möglich, sobald beispielsweise bestimmte Prognosemodelle einen Sporenflug

prognostizieren, besonders vor dem Hintergrund der hier dargestellten hohen Pflanzenverträglichkeit der Öle.

Die Ergebnisse aus den Versuchen zur insektiziden Wirkung lassen zudem erkennen, dass der Einsatz von trocknenden und halbtrocknenden Pflanzenölen einen Einfluss auf die Mortalität und Fekundität von Schädlingen hat. Hierbei zeigte vor allem das kurativ applizierte habtrocknende Rapsöl eine hohe Wirkung hinsichtlich der Mortalität von Läusen und Kartoffelkäfern. Dabei beruht die Wirkung des Rapsöls überwiegend auf einem dünnen Ölfilm, der die Insekten überzieht und diese erstickt. Auch diese Ergebnisse stellen für die Praxis einen brauchbaren Ansatz dar, eine Wirkung zu erzielen, sobald sich ein Schädling bereits auf der Fläche befindet. Aber auch die protektive insektizide Wirkung des Tungöls stellt einen wichtigen Ansatz für die Praxis dar, bereits im Vorfeld, bevor die Schädlinge auf einer Fläche auftreten, handeln zu können. Auch diese abschreckende Wirkung ließ sich auf die Eigenschaften bzw. die Fettsäurezusammensetzung des Tungöls zurückführen.

Da die beschriebene Wirkung vielmehr auf eine physikalische Wirkungsweise als auf eine chemische zurückzuführen scheint, wird eine mögliche Entwicklung von Resistenzen als unwahrscheinlich angesehen. Denn Kontaktfungizide weisen im Vergleich zu systemischen Fungiziden ein geringeres Risiko für Resistenzen auf. Auch diese Tatsache ist für eine Anwendung in der Praxis von Vorteil. Darüber hinaus stellt auch die Möglichkeit, die Öle mit anderen Wirkstoffen, Produkten und Mitteln mischen zu können, ein großes Potenzial für eine Anwendung im integrierten Pflanzenschutz dar. Lediglich die Tatsache, dass für den Tungölbaum derzeit keine große Anbaufläche in Deutschland vorzufinden ist, und das Tungöl somit größtenteils importiert werden müsste, stellt eine Hürde für den zukünftigen Einsatz dieses Öls als Pflanzenschutzmittel dar.

Die vorliegenden Ergebnisse dieser Arbeit zeigen bereits ein hohes Potenzial für den Einsatz von glyceridischen trocknenden und halbtrocknenden Pflanzenölen im integrierten Pflanzenschutz oder für den Einsatz als „Biorationals“. Um dieses Potenzial weiter zu untermauern, sollten umfangreiche Freilandversuche durchgeführt werden, um beispielsweise auch weitere exogene Umwelteinflüsse mit zu betrachten. Auch sollten in einem weiteren Ansatz die Untersuchungen auf weitere Schädlinge und Pathogene ausgeweitet werden, mit zusätzlicher Betrachtung von Nützlingen und Bienen. Darüber hinaus sollte der bereits erwähnte Ansatz einer möglichen herbiziden Anwendung ebenfalls untersucht werden. Auch betriebswirtschaftliche Aspekte, wie Kosten-Nutzen-Analysen gegenüber herkömmlichen Pflanzenschutzmitteln, sollten näher betrachtet werden.

Für eine offizielle Zulassung als Pflanzenschutzmittel gibt es zudem weitere, umfangreiche Prüfschritte und Vorgaben, die alle noch gemeistert werden müssten. Dennoch konnte im Rahmen dieser Arbeit bereits das grundsätzliche Potenzial der trocknenden glyceridischen Pflanzenöle für den Bereich Pflanzenschutz gezeigt werden.

Finanzierung

Diese Forschung wurde durch ein Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (AZ: 20016/420; Projekt: „Biobasierte, selbsttrocknende Pflanzenölfilme zum Schutz von Pflanzen gegenüber Umweltstress“) und durch das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert (FKZ: 17-02.04.01-08/2018).

Literaturverzeichnis

Abbott, W.S. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.* **1925**, *18*, 265–267.

Agnello, A.M. Petroleum-derived spray oils: chemistry, history, refining and formulation. In: *Spray Oils Beyond 2000*, Sustainable Pest and Disease Management; Beattie, G.A.C., Watson, D.M., Stevens, M.L., Rae, D.J., Spooner-Hart R.N., Eds.; University of Western Sydney: Sydney, **2002**, pp. 2–18, ISBN: 1 86341 902 0.

Agrios, G.N. *Plant Pathology*. 5th ed. Elsevier Academic Press. **2004**, pp. 562–582, ISBN-13: 978-0-12-044565-3.

Ah Chee, A.; George, M.; Alavi, M.; Wurms, K. Lipid-based bio-fungicides for control of powdery mildew in cucurbits. *N. Z. Plant Prot.* **2018**, *71*, 262–271, doi:10.30843/nzpp.2018.71.123.

Alam, M.; Akram, D.; Sharmin, E.; Zafar, F.; Ahmad, S. Vegetable oil based eco-friendly coating materials: A review article. *Arabian J. Chem.* **2014**, *7*, 469–479, doi:10.1016/j.arabjc.2013.12.023.

Allen, D.J. *Verticillium lecanii* on the bean rust fungus *Uromyces appendiculatus*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* **1982**, *79*, 362–364.

Alyokhin, A. Colorado Potato Beetle Management on Potatoes: Current Challenges and Future Prospects. In: *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*; Tennant, P., Benkeblia, N., Eds.; Global Science Books, **2009**, pp. 10–19.

Alyokhin, A.; Baker, M.; Mota-Sanchez, D.; Dively, G.; Grafius, E. Colorado potato beetle resistance to insecticides. *Am. J. Potato Res.* **2008**, *85*, 395–413, doi:10.1007/s12230-008-9052-0.

Akca, I.; Ayvaz, T.; Yazici, E.; Smith, C.L.; Chi, H. Demography and Population Projection of *Aphis fabae* (Hemiptera: Aphididae): with Additional Comments on Life Table Research Criteria. *J. Econ. Entomol.* **2015**, *108*, 1466–1478, doi:10.1093/jee/tov187.

Arslan, U. Efficacy of plant oils on the control of bean rust and wheat leaf rust. *Fresenius Environ. Bull.* **2014**, *23*, 2259–2265.

Aziz, Z.A.A.; Ahmad, A.; Setapar, S.H.M.; Karakucuk, A.; Azim, M.M.; Lokhat, D.; Rafatullah, M.; Ganash, M.; Kamal, M.A.; Ashraf, G.M. Essential oils: extraction techniques, pharmaceutical and therapeutic potential - a review. *Curr. Drug Metab.* **2018**, *19*, 1100–1110, doi:10.2174/1389200219666180723144850.

Baker, C.J.; Stavely, J.R.; Mock, N. Biocontrol of bean rust by *Bacillus subtilis* under field conditions. *Plant Dis.* **1985**, *69*, 770–772.

Baker, C.J.; Stavely, J.R.; Thomas, C.A.; Sasser, M.; MacFall, J.S. Inhibitory effect of *Bacillus subtilis* on *Uromyces phaseoli* and development of rust pustules on bean leaves. *Phytopathol.* **1983**, *73*, 1148–1152.

Baker, J.M. The effects of oils on plants. *Environ. Pollut.* **1970**, *1*, 27–44.

Baliota G.V.; Athanassiou, C.G. Use of paraffin oils in agriculture and beyond: back to the future. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **2023**, *30*, 2392–2405, doi:10.1007/s11356-022-24059-5.

Bannari, A.; Morin, D.; Bonn, F.; Huete, A.R. A review of vegetation indices. *Remote Sens. Rev.* **1995**, *13*, 95–120, doi:10.1080/02757259509532298.

Barzman, M.; Bàrberi, P.; Birch, A.N.E.; Boonekamp, P.; Dachbrodt-Saaydeh, S.; Graf, B.; Hommel, B.; Jensen, J.E.; Kiss, J.; Kudsk, P.; Lamichhane, J.R.; Messéan, A.; Moonen, A.-C.; Ratnadass, A.; Ricci, P.; Sarah, J.-L.; Sattin, M. Eight principles of integrated pest management. *Agron. Sustainable Dev.* **2015**, *35*, 1199–1215, doi:10.1007/s13593-015-0327-9.

Basaid, K.; Chebli, B.; Mayad, E.H.; Furze, J.N.; Bouharroud, R.; Krier, F.; Barakate, M.; Paulitz, T. Biological activities of essential oils and lipopeptides applied to control plant pests and diseases: a review. *Int. J. Pest Manag.* **2021**, *67*, 155–177, doi:10.1080/09670874.2019.1707327.

Bassanezi, R.B.; Amorim, L.; Filho, A.B.; Hau, B.; Berger, R.D. Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage. *Plant Pathol.* **2001**, *50*, 443–452, doi:10.1046/j.1365-3059.2001.00584.x.

Bassett, M.J. Linkage Mapping of Marker Genes in Common Bean. In: *Genetic Resources of Phaseolus Beans. Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture*; Gepts, P., Ed.; Vol. 6, Springer: Dordrecht, **1988**, pp. 329–353, doi:10.1007/978-94-009-2786-5_13.

Bathon, H. Nematodenpräparate. In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005**, pp. 110–125, ISBN: 3800147548.

Beattie, G.A.C., Jacas, J., Nicetic, O., Watson, D.M. Evaluation of rapeseed-based plant oils for control of citrus leafminer and their phytotoxicity to lemon. In: *Spray Oils Beyond 2000, Sustainable Pest and Disease Management*; Beattie, G.A.C., Watson, D.M., Stevens, M.L., Rae, D.J., Spooner-Hart, R.N., Eds.; University of Western Sydney: Sydney, Australia, **2002**, pp. 157–161, ISBN: 1 86341 902 0.

Becker, J. Spinosad. In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005**, pp. 132–139, ISBN: 3800147548.

Biofa. Cutisan. **2023a.** Online verfügbar: <https://biofa-profi.de/de/schutz-vor-sonnenbrand/cutisan.html> (Stand: 19.08.2024).

Biofa. Naturalis®. **2023b.** Online verfügbar: <https://www.biofa-profi.de/de/weisse-fliege-350/naturalis.html> (Stand: 21.08.2024).

Blackburn, G.A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *Int. J. Remote Sens.* **1998**, *19*, 657–675.

Blackman, R.L.; Eastop, V.F. Aphids on the World's Crops – An Identification and Information Guide. 2. Auflage, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, **2000**, ISBN: 0471851914.

Boerema, G.H.; Pieters, R.; Hamers, M.E.C. Check-list for scientific names of common parasitic fungi. Supplement Series 2c, d (additions and corrections): Fungi on field crops: pulse (legumes), forage crops (herbage legumes), vegetables and cruciferous crops. *Neth. J. Plant Pathol.* **1993**, *99*, 1–32.

Börner, H. Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. 8. Auflage, Springer-Verlag; Berlin & Heidelberg, **2009**, ISBN: 978-3-540-49067-8

Bográn, C.E.; Ludwig, S.; Metz, B. Using Oils As Pesticides. *AgriLife Extension.* **2006.**

Boiteau, G.Y.; Pelletier, G.C.; Misener, G.B. Development and Evaluation of a Plastic Trench Barrier for Protection of Potato from Walking Adult Colorado Potato Beetles (Coleoptera: Chrysomelidae). *J. Econ. Entomol.* **1994**, *87*, 1325–1331, doi:10.1093/jee/87.5.1325.

Boivin, G.; Hance, T.; Brodeur, J. Aphid parasitoids in biological control. *Can. J. Plant Sci.* **2012**, *92*, 1–12, doi:10.4141/CJPS2011-045.

Brendel, E. Alternative Bekämpfungsstrategien gegen die Kleine Weiße Rosenschildlaus *Aulacaspis rosae* (Bouché) (Hemiptera: Diaspididae) an Schnittrosen unter Glas mittels dem Einsatz von Leinöl. *Gesunde Pflanz.* **2013**, *65*, 73–77, doi:10.1007/s10343-013-0296-3.

Browning, J.A.; Frey, K.J. Multiline Cultivars as a Means of Disease Control. *Annu. Rev. Phytopathol.* **1969**, *7*, 355–382, doi:10.1146/annurev.py.07.090169.002035.

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). *Zugelassene Pflanzenschutzmittel. Auswahl für den ökologischen Landbau nach der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 2021/1165.* **2023a.** Online verfügbar: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/psm_oekoliste-DE.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (Stand: 15.07.2023).

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Verzeichnis zugelassener Pflanzenschutzmittel – Standardsuche. **2023b.** Online verfügbar: <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp> (Stand: 15.07.2023).

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Beendete Zulassungen von Pflanzenschutzmitteln (Stand: Januar 2023), **2023c.** Online verfügbar: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/Beendete_PSM.html (Stand: 18.07.2023).

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Notfallzulassung nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 für das Pflanzenschutzmittel: Novodor FC®, **2023d.** Online verfügbar: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_notfallzulassungen/Novodor_FC_Kartoffelk%C3%A4fer_Kartoffel_%C3%96ko_2023.html?nn=11031260 (Stand: 15.07.2023).

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Naturalis®, **2023e.** Online verfügbar: <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/DatenBlatt.jsp?kennr=007198-00> (Stand: 14.07.2023).

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Notfallzulassung nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 für das Pflanzenschutzmittel: Quassiaextrakt MD, **2023f.** Online verfügbar: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_notfallzulassungen/Quassiaextrakt_MD_Hopfenblattlaus_Saegewespen_Oeko_2023.html?nn=11031260 (Stand: 15.07.2023).

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. BMEL, Ed.; Bonn, Deutschland, **2017.**

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Die wichtigsten rechtlichen Regelungen im Pflanzenschutz. **2023.** Online verfügbar: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/pflanzenschutz/rechtliche-regelungen.html> (Stand: 18.08.2024).

Buteler, M.; Stadler, T. A Review on the Mode of Action and Current Use of Petroleum Distilled Spray Oils. In: *Pesticides in the Modern World*, Pesticides Use and Management; Stoytcheva, M., Ed.; IntechOpen: University of Baja California, Baja California, Mexico, **2011**, pp. 119–136, ISBN: 978-953-307-459-7.

Cao, X.; Luo, Y.; Zhou, Y.; Duan, X.; Cheng, D. Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance. *Crop Prod.* **2013**, *45*, 124–131, doi:10.1016/j.cropro.2012.12.002.

Capinera, J.L. *Handbook of Vegetable Pests*. Academic Press: New York. **2001**.

Carter, G.A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *Int. J. Remote Sens.* **1994**, *15*, 697–703, doi:10.1080/01431169408954109.

Casagrande, R.A. The Colorado potato beetle: 125 years of mismanagement. *Bull. Entomol. Soc. Am.* **1987**, *33*, 142–150.

Ceccato, P.; Flasse, S.; Tarantola, S.; Jacquemoud, S.; Grégoire, J.-M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.* **2001**, *77*, 22–33, doi:10.1016/S0034-4257(01)00191-2.

Cen, Y.J.; Tian, M.Y.; Pang, X.F.; Rae, D.J. Repellency, antifeeding effect and toxicity of a horticultural mineral oil against citrus red mite. In: *Spray Oils Beyond 2000*, Sustainable Pest and Disease Management; Beattie, G.A.C., Watson, D.M., Stevens, M.L., Rae, D.J., Spooner-Hart, R.N., Eds.; University of Western Sydney: Sydney, Australia, **2002**. pp. 134–141, ISBN: 1863419020.

Chen, W.-Y.; Ko, W.-H. Flaxseed Oil for Control of Peanut Rust and Its Disease Control Mechanism. *J. Phytopathol.* **2015**, *163*, 271–278, doi:10.1111/jph.12316.

Clayton, E.E.; Smith, T.E.; Shaw, K.J.; Gaines, J.G.; Graham, T.W.; Yeager, C.C. Fungicidal tests on blue mold (*Peronospora tabacina*) of tobacco. *J. Agric. Res. (Washington, D. C.)*. **1943**, *66*, 261–276.

Cohen, Y.; Gisi, U.; Mosinger, E. Systemic resistance of potato plants against *Phytophthora infestans* induced by unsaturated fatty acids. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* **1991**, *38*, 255–263, doi:10.1016/S0885-5765(05)80117-1.

Cook, S.M.; Khan, Z.R.; Pickett, J.A. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annu. Rev. Entomol.* **2007**, *52*, 375–400, doi:10.1146/annurev.ento.52.110405.091407.

Corteva. Spintor. **2020.** Online verfügbar: <https://www.corteva.de/content/dam/dpagco/corteva/eu/de/de/products/files/produktinformation-2020/Spintor%20Produktinformation%202020.pdf> (Stand: 07.12.2020).

Daniel C. *Rhagoletis cerasi*: Oviposition Reduction Effects of Oil Products. *Insects.* **2014**, *5*, 319–331, doi:10.3390/insects5020319.

Dedryver, C.A.; Le Ralec, A.; Fabre, F. The conflicting relationships between aphids and men: a review of aphid damage and control strategies. *C. R. Biol.* **2010**, *333*, 539–553, doi:10.1016/j.crv.2010.03.009.

Delalieux, S.; Auwerkerken, A.; Verstraeten, W.W.; Somers, B.; Valcke, R.; Lhermitte, S.; Keulemans, J.; Coppin, P. Hyperspectral Reflectance and Fluorescence Imaging to Detect

Scab Induced Stress in Apple Leaves. *Remote Sens.* **2009b**, 1, 858–874, doi:10.3390/rs1040858.

Delalieux, S.; Somers, B.; Verstraeten, W.W.; van Aardt, J.A.N.; Keulemans, W.; Coppin, P. Hyperspectral indices to diagnose leaf biotic stress of apple plants, considering leaf phenology. *Int. J. Remote Sens.* **2009a**, 30, 1887–1912, doi:10.1080/01431160802541556.

Del Ponte, E.M.; A.-K., Mahlein; Bock, C.H. Chapter 6 - Plant disease quantification. In: *Agrios' Plant Pathology*; 6. Edition. Oliver, R.P., Ed.; Academic Press. **2024**, pp. 211–225, ISBN: 9780128224298.

Deong, E.R.; Knight, H.; Chamberlin, J.C. A preliminary study of petroleum oil as an insecticide for citrus trees. *Hilgardia*. **1927**, 2, 351–386, doi:10.3733/hilg.v02n09p351.

Derksen, J.T.P.; Cuperus, F.P.; Kolster, P. Paints and coatings from renewable resources. *Ind. Crops Prod.* **1995**, 3, 225–236, doi:10.1016/0926-6690(94)00039-2.

Devonshire, A.L. Resistance of aphids to insecticides. In: *Aphids, their biology, natural enemies and control*; Minks, A.K., Harrewijn, P., Eds.; Elsevier: Amsterdam, **1989**, pp. 123–139.

Deyton, D.E.; Sams, C.E.; Pless, C.D. Soybean oil delays peach tree flowering, thins fruit, and kills key arthropod pests of deciduous fruit trees. In: *Spray Oils Beyond 2000*, Sustainable Pest and Disease Management; Beattie, G.A.C., Watson, D.M., Stevens, M.L., Rae, D.J., Spooner-Hart, R.N., Eds.; University of Western Sydney: Sydney, Australia, **2002**. pp. 410–418, ISBN: 1863419020.

Dimetry, N.Z.; Schmidt, G.H. Efficacy of Neem-Azal S and Margosan-O against the bean aphid, *Aphis fabae* Scop. *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*. **1992**, 65, 75–79.

Dirlbek, J. Versuche zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers, *Leptinotarsa decemlineata* Say und der Gewächshausmottenschildlaus, *Trialeurodes vaporariorum* Westw. mittels *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. *J. Pest Sci.* **1988**, 61, 145–147, doi:10.1007/BF01905989.

Durchführungsverordnung (EU) 2019/677 der Kommission vom 29. April 2019 zur Nichterneuerung der Genehmigung für den Wirkstoff Chlothalonil gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 540/2011 der Kommission. *Durchführungsverordnung (EU) 2019/677*, **2019**.

Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165 der Kommission vom 15. Juli 2021 über die Zulassung bestimmter Erzeugnisse und Stoffe zur Verwendung in der ökologischen/biologischen Produktion und zur Erstellung entsprechender Verzeichnisse. *Durchführungsverordnung (EU) 2021/1165*, **2009**. Online verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1165> (Stand: 18.08.2024).

Ebadollahi, A.; Jalali Sendi, J.; Ziaee, M.; Krutmuang, P. Acaricidal, Insecticidal, and Nematicidal Efficiency of Essential Oils Isolated from the *Satureja* Genus. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. **2021**, 18, 6050, doi:10.3390/ijerph18116050.

Ebrahimi, L.; Niknam, G.; Lewis, E.E. Lethal and sublethal effects of Iranian isolates of *Steinernema feltiae* and *Heterorhabditis bacteriophora* on the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *BioControl*. **2011**, 56, 781–788, doi:10.1007/s10526-011-9343-0.

Elshafie, H.S.; Mancini, E.; Ippolito, C.; De Martino, L.; De Feo, V. In vivo antifungal activity of two essential oils from Mediterranean plants against postharvest brown rot disease of peach fruit. *Ind. Crops Prod.* **2015**, *66*, 11–15, doi:10.1016/j.indcrop.2014.12.031.

Europäische Kommission (EU Kommission). Neonicotinoids. **2020**. Online verfügbar: https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/approval_active_substances/approval_renewal/neonicotinoids_en (Stand: 20.11.2020).

European Food Safety Authority Panel on Plant Health (EFSA Panel on Plant Health (PLH)); Bragard, C.; Dehnen-Schmutz, K.; Di Serio, F.; Gonthier, P.; Jacques, M.-A.; Jaques Miret, J.A.; Justesen, A.F.; Magnusson, C.S.; Milonas, P.; Navas-Cortes, J.A.; Parnell, S.; Potting, R.; Reignault, P.L.; Thulke, H.-H.; Van der Werf, W.; Civera, A.V.; Yuen, J.; Zappalà, L.; Kertesz, V.; Maiorano, A.; Streissl, F.; MacLeod, A. Pest categorisation of *Leptinotarsa decemlineata*. *EFSA J.* **2020**, *18*, doi:10.2903/j.efsa.2020.6359.

Feldmann, F.; Carstensen, C. Efficacy and risks of “biorationals”. *J. Plant Dis. Prot.* **2018**, *125*, 517–521, doi:10.1007/s41348-018-0186-0.

Feng, W.; Qi, S.; Heng, Y.; Zhou, Y.; Wu, Y.; Liu, W.; He, L.; Li, X. Canopy Vegetation Indices from *In situ* Hyperspectral Data to Assess Plant Water Status of Winter Wheat under Powdery Mildew Stress. *Front Plant Sci.* **2017**, *8*, 1219, doi:10.3389/fpls.2017.01219.

Fink, W.; Deising, H.; Mendgen, K. Rostpilze: Ihre Entwicklung und Interaktion mit Wirts- und Nichtwirtspflanzen. *Forum Mikrobiologie.* **1989**, 437–443.

Firestone, D. *Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes*; 3rd ed. AOCS Press: Urbana, United States, **2013**, ISBN: 9780983079194.

Fleming, W.E.; Baker, F.E. Testing Contact Insecticides on the Japanese Beetle, and Results with Some Sodium and Potassium Soaps. *J. Agric. Res.* **1934**, 29–38.

Gabrys B.; Kordan, B. Cultural Control and other Non-Chemical Methods. In: *Insect Pests of Potato*; Alyokhin, A., Vincent, C., Giordanengo, P., Eds.; Academic Press, **2013**, pp. 517–541, doi:10.1016/B978-0-12-386895-4.00018-1.

Galli, M.; Feldmann, F.; Vogler, U.K.; Kogel, K.H. Can biocontrol be the game-changer in integrated pest management? A review of definitions, methods and strategies. *J. Plant Dis. Prot.* **2024**, *131*, 265–291, doi:10.1007/s41348-024-00878-1.

Gamon, J.A.; Field, C.B.; Goulden, M.; Griffin, K.L.; Hartley, A.E.; Joel, G.; Peñuelas, J.; Valentini, R. Relationships between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in three Californian Vegetation Types. *Ecol. Appl.* **1995**, *5*, 28–41, doi:10.2307/1942049.

Gamon, J.A.; Surfus, J.S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytol.* **1999**, *143*, 105–117, doi:10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x.

Garbulsky, M.F.; Peñuelas, J.; Gamon, J.; Inoue, Y.; Filella, I. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 281–297, doi:10.1016/j.rse.2010.08.023.

Gaud, W.S. The Green Revolution: Accomplishments and Apprehensions. *AgBioWorld*, **1968**. Online verfügbar: <http://www.agbioworld.org/biotech-info/topics/borlaug/borlaug-green.html> (Stand: 18.08.2024).

- Gisi, U.** Risiken für Anwender, Verbraucher und Umwelt. In: *Lehrbuch der Phytomedizin*; Poehling H.M., Verreet, J.-A. Eds.; 4. Auflage, Eugen Ulmer KG: Stuttgart, **2013**, pp. 463–466, ISBN: 9783800151646.
- Gitelson, A.A.; Chivkunova, O.B.; Merzlyak, M.N.** Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves. *Am. J. Bot.* **2009**, 96, 1861–1868, doi:10.3732/ajb.0800395.
- Gitelson, A.A.; Merzlyak, M.N.** Non-Destructive Assessment of Chlorophyll Carotenoid and Anthocyanin Content in Higher Plant Leaves: Principles and Algorithms. *Remote Sensing for Agriculture and the Environment*. **2004**, 78–94.
- Gitelson, A.A.; Merzlyak, M.N.; Chivkunova, O.B.** Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves. *Photochem. Photobiol.* **2001**, 74, 38–45.
- Halder, J.; Rai, A.S.; Kodandaram, M.H.** Compatibility of Neem Oil and Different Entomopathogens for the Management of Major Vegetable Sucking Pests. *National Academy Science Letter*. **2013**, 36, 19–25.
- Hale, F.A.; Johnson, R.; Grant, J.F.** Colorado Potato Beetle. *Vegetable Pests*. **2009**.
- Hallmann, J.; Quadt-Hallmann A.; von Tiedemann A.** Phytomedizin – Grundwissen Bachelor. 2. Auflage, Eugen Ulmer KG: Stuttgart, **2009**, ISBN: 9783825228637.
- Hansson, D.; Morra, M.J.; Borek, V.; Eigenbrode, S.D.** Green peach aphid [*Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae)] control using Brassicaceae ethyl ester oil sprays. *J. Appl. Entomol.* **2012**, 137, 530–539, doi:10.1111/jen.12027.
- Havis, J.R.** Herbicidal Properties of Petroleum Hydrocarbons. Cornell University Agricultural Experiment Station, **1950**, 298, 1–20.
- Heftner, G.** *Technologie der Fette und Öle. Handbuch der Gewinnung und Verarbeitung der Fette, Öle und Wachsarten des Pflanzen- und Tierreichs.* Zweiter Band. Gewinnung der Fette und Öle. Spezieller Teil. Springer Verlag. **1921**.
- Hilbeck, A.; Eckel, C.; Kennedy G.G.** Predation on Colorado Potato Beetle Eggs by Generalist Predators in Research and Commercial Potato Plantings. *Biological Control*. **1997**, 8, 191–196, doi:10.1006/bcon.1997.0506.
- Hitchner, E.M.; Kuhar, T.P.; Dively, G.P.; Youngman, R.R.; Philips, C.R.; Anderson, T.D.** Baseline toxicity and field efficacy of metaflumizone on Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *J. Econ. Entomol.* **2012**, 105, 207–213, doi:10.1603/ec11103.
- Hoffer, R.M.; Johannsen, C.J.** Ecological Potential in Spectral Signature Analysis. In: *Remote Sensing in Ecology*; Johnson, P., Ed.; University of Georgia Press: Athens, **1969**.
- Hommes, M.; Siekmann, G.; Piepenbrock, O.; Baur, U.; Fricke, A.; Thieme, T.** Reduzierung des Blattlausbefalls an ausgewählten Gemüsekulturen durch Mulchen mit verschiedenen Materialien und Farben; Abschlussbericht, Bundesprogramm Ökologischer Landbau. **2003**.
- Horowitz, A.R.; Ellsworth, P.C.; Ishaaya, I.** Biorational Pest Control – An Overview. In: *Biorational Control of Arthropod Pests. Application and Resistance Management*; 1st ed. Ishaaya, I., Horowitz, A.R., Eds.; Springer: Dordrecht Heidelberg London New York. **2009**, pp. 1–20, ISBN: 978-90-481-2315-5.

Hough-Goldstein, J.A.; Heimpel, G.E.; Bechmann, H.E.; Mason, C.E. Arthropod natural enemies of the Colorado potato beetle. *Crop. Prot.* **1993**, *12*, 324–334.

Hoy, C.W.; Vaughn, T.T. East, D.A. Increasing the effectiveness of spring trap crops for *Leptinotarsa decemlineata*. *Entomol. Exp. Appl.* **2000**, *96*, 193–204.

Hsiao, T.H.; G. Fraenkel, G. Selection and Specificity of the Colorado Potato Beetle for Solanaceous and Nonsolanaceous Plants. *Ann. Entomol. Soc. Am.* **1968**, *61*, 493–503, doi:10.1093/aesa/61.2.493.

Huber, J. Viruspräparate. In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005**, pp. 15–28, ISBN: 3800147548.

Hunt, E.R.; Rock, B.N. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sens. Environ.* **1989**, *30*, 43–54, doi:10.1016/0034-4257(89)90046-1.

Iriti, M.; Faoro, F. Benzothiadiazole (BTH) induces cell-death independent resistance in *Phaseolus vulgaris* against *Uromyces appendiculatus*. *J. Phytopathol.* **2003**, *151*, 171.

Jaastad, G. Late dormant rapeseed oil treatment against black cherry aphid and cherry fruit moth in sweet cherries. *J. Appl. Entomol.* **2007**, *131*, 284–288, doi:10.1111/j.1439-0418.2007.01155.x.

Jacobsen, B.J. Role of plant pathology in integrated pest management. *Annu Rev. Phytopathol.* **1997**, *35*, 373–391, doi:10.1146/annurev.phyto.35.1.373.

Jacobson, M.; Crystal, M.M.; Warthen, J.D. Boll Weevil Feeding Deterrents from Tung Oil. *J. Agric. Food Chem.* **1981**, *29*, 591–593, doi:10.1021/jf00105a039.

Jacques, R.; Fasulo, T. Colorado Potato Beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say), and False Potato Beetle, *Leptinotarsa juncta* (Germar) (Insecta: Coleoptera: Chrysomelidae). *IFAS Extension*. **2015**.

Jamar, L.; Lefrancq, B.; Lateur, M. Control of apple scab (*Venturia inaequalis*) with bicarbonate salts under controlled environment. *J. Plant Dis. Prot.* **2007**, *114*, 221–227, doi:10.1007/BF03356221.

Jespersen, N. Chapter 5 General principles of spectroscopy and spectroscopic analysis. *Compr. Anal. Chem.* **2006**, *47*, 111–155, doi:10.1016/S0166-526X(06)47005-7.

Jiang, W.G.; Lu, W.P.; Guo, W.C.; Xia, Z.H.; Fu, W.J.; Li, G.Q. Chlorantraniliprole susceptibility in *Leptinotarsa decemlineata* in the North Xinjiang Uygur Autonomous region in China. *J. Econ. Entomol.* **2012**, *105*, 549–554.

Kaethner, M. Fitness reduction and mortality effects of neem-based pesticides on the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* Say (Col., Chrysomelidae). *J. Appl. Ent.* **1992**, *113*, 456–465.

Kersting, F. Probleme der Applikationstechnik im Pflanzenschutz. *Z. Pflanzenkr. Pflanzenschutz*. **1969**, *76*, 484–500.

Kesraoui, S.; Andrés, M.F.; Berrocal-Lobo, M.; Soudani, S.; Gonzalez-Coloma, A. Direct and Indirect Effects of Essential Oils for Sustainable Crop Protection. *Plants*. **2022**, *11*, 2144, doi:10.3390/plants11162144.

Khan, H.A.A. Toxicity, repellent and oviposition deterrent effects of select essential oils against the house fly *Musca domestica*. *J. Asia Pac. Entomol.* **2021**, 24, 15–20, doi:10.1016/j.aspen.2020.10.002.

Kim, J.J.; Goettel, M.S.; Gillespie, D.R. Evaluation of *Lecanicillium longisporum*, Vertalec® against the cotton aphid, *Aphis gossypii*, and cucumber powdery mildew, *Sphaerotheca fuliginea* in a greenhouse environment. *Crop Prot.* **2010**, 29, 540–544, doi:10.1016/j.cropro.2009.12.011.

Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB). Bittenfelder Sämling. **2023**. Online verfügbar: <https://www.kob-bavendorf.de/sorten-detail/name/Bittenfelder%20S%C3%A4mling.html> (Stand: 16.11. 2023).

Koppert Biological Systems. Mycotal – also effective against aphids! **2020**. Online verfügbar: <https://www.koppert.com/news/mycotal-also-effective-against-aphids/> (Stand: 14.07.2023).

Koul, O.; Walia, S.; Dhaliwal, G.S. Essential Oils as Green Pesticides: Potential and Constraints. *Biopestic. Int.* **2008**, 4, 63–84.

Kraska, T., Vergleichende Untersuchungen von Resistenzinduktoren, deren Wirkungsweise und dem Einfluß auf die DNA-Methylierung. Universität Hannover, Dissertation. Verlag Papierflieger: Clausthal-Zellerfeld. **1996**.

Krist, S. *Lexikon der pflanzlichen Fette und Öle*; 2nd ed., Springer Verlag: Wien. **2013**, ISBN-13: 978-3709110041.

Kühne, S.; Burth, U.; Marx, P. Biologischer Pflanzenschutz im Freiland – Pflanzengesundheit im Ökologischen Landbau. Eugen Ulmer KG: Stuttgart, **2006**, ISBN: 9783800147816.

Kuhlmann, B.; Jacques, D.F. Classifications, standards and nomenclature—mineral oils, agricultural mineral oils and horticultural mineral oils. In: *Spray Oils Beyond 2000*, Sustainable Pest and Disease Management; Beattie, G.A.C., Watson, D.M., Stevens, M.L., Rae, D.J., Spooner-Hart R.N., Eds.; University of Western Sydney: Sydney, Australia, **2002**, pp. 2–18, ISBN: 1 86341 902 0.

Langenbruch, G.-A.; Hommel, B.; Becker, N. Bakterienpräparate. In *Natürliche Schädlingbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005**, pp. 29–86, ISBN: 3800147548.

Lashomb, J.H.; Ng, Y.S. Colonization by Colorado potato beetles, *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae), in rotated and nonrotated potato fields. *Environ. Entomol.* **1984**, 13, 1352–1356.

Lichtenthaler, H.K. Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants. *J. Plant Physiol.* **1996**, 148, 4–14, doi:10.1016/S0176-1617(96)80287-2.

Liebenberg, M.M.; Liebenberg, A.J.; Pretorius, Z.A. Breeding for rust resistance increases dry bean productivity in South Africa. *S. Afr. J. Plant. Soil.* **2005**, 22, 129–139, doi:10.1080/02571862.2005.10634695.

Liebenberg, M.M.; Pretorius, Z.A. Common Bean Rust: Pathology and Control. In: *Horticultural Reviews*; Janick, J. Ed.; Wiley-Blackwell. **2010**, pp. 1–99, doi:10.1002/9780470543672.ch1.

Lligadas, G.; Ronda, J.C.; Galià, M.; Cádiz, V. Renewable polymeric materials from vegetable oils: a perspective. *Mater. Today*. **2013**, *16*, 337–343, doi:10.1016/j.mattod.2013.08.016.

Lobato, A.K.S.; Gonçalves-Vidigal, M.C.; Vidigal Filho, P.S.; Andrade, C.A.B.; Kvitschal, M.V.; Bonato, C.M. Relationships between leaf pigments and photosynthesis in common bean plants infected by anthracnose. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* **2010**, *38*, 29–37, doi:10.1080/01140671003619308.

MacHardy, W.E. Apple Scab, Biology, Epidemiology, and Management. The American Phytopathological Society: Minnesota, USA. **1996**.

Mahlein, A.-K.; Kuska, M.T.; Behmann, J.; Polder, G.; Walter, A. Hyperspectral Sensors and Imaging Technologies in Phytopathology: State of the Art. *Annu. Rev. Phytopathol.* **2018**, *56*, 535–558, doi:10.1146/annurev-phyto-080417-050100.

Mahlein, A.-K.; Rumpf, T.; Welke, P.; Dehne, H.-W.; Plümer, L.; Steiner, U.; Oerke, E.-C. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sens. Environ.* **2013**, *128*, 21–30, doi:10.1016/j.rse.2012.09.019.

Main, R.; Cho, M.A.; Mathieu, R.; O’Kennedy, M.M.; Ramoelo, A.; Koch, S. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2011**, *66*, 751–761, doi:10.1016/j.isprsjprs.2011.08.001.

Marčić, D. Sublethal effects of spirodiclofen on life history and life-table parameters of two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*). *Exp. Appl. Acarol.* **2007**, *42*, 121–129, doi:10.1007/s10493-007-9082-1.

Marčić, D.; Perić, P.; Prijović, M.; Ogurlić, I. Field and greenhouse evaluation of rapeseed spray oil against spider mites, green peach aphid and pear psylla in Serbia. *Bull. Insectology*. **2009**, *62*, 159–167, ISSN: 17218861.

Martin, H.; Salmon, E.S. The fungicidal properties of certain spray-fluids, X: Glyceride oils. *J. Agric. Sci.* **1933**, *23*, 228–251, doi:10.1017/S0021859600053028.

Martín López, B.; López López, V.; Cabaleiro Sobrino, C. Short communication. Repellency and toxicity of oils from different origins on *Myzus persicae* Sulzer (Homoptera: Aphididae) in pepper. *Span. J. Agric. Res.* **2003**, *1*, 73–77, doi:10.5424/sjar/2003014-52.

Masyita, A.; Sari, R.M.; Astuti, A.D.; Yasir, B.; Rumata, N.R.; Emran, T.B.; Nainu, F.; Simal-Gandara, J. Terpenes and Terpenoids as Main bioactive compounds of essential oils, their roles in human health and potential application as natural food preservatives. *Food Chem. X*. **2022**, *13*, 100217, doi:10.1016/J.FOCHX.2022.100217.

Matyjaszczyk, E. “Biorationals” in integrated pest management strategies. *J. Plant Dis. Prot.* **2018**, *125*, 523–527, doi:10.1007/s41348-018-0180-6.

Meier, M.A.R.; Metzger, J.O.; Schubert, U.S. Plant oil renewable resources as green alternatives in polymer science. *Chem. Soc. Rev.* **2007**, *36*, 1788–1802, doi:10.1039/b703294c.

Mendgen, K. Der Infektionsverlauf von *Uromyces phaseoli* bei anfälligen und resistenten Bohnensorten. *Phytopathol. Z.* **1978**, *93*, 295–313, doi:10.1111/j.1439-0434.1978.tb03666.x.

Meyhöfer, R.; Poehling, H.M. Arthropoda (Gliederfüßer), In: *Lehrbuch der Phytomedizin*; Poehling H.M., Verreet, J.-A. Eds.; 4. Auflage, Eugen Ulmer KG: Stuttgart, **2013**, pp. 210–262, ISBN: 9783800151646.

Miao, S.; Wang, P.; Su, Z.; Zhang, S. Vegetable-oil-based polymers as future polymeric biomaterials. *Acta Biomater.* **2013**, *10*, 1692–1704, doi:10.1016/j.actbio.2013.08.040.

Misener, G.C.; Boiteau, G.; McMillan, L.P. A plastic-lining trenching device for the control of Colorado potato beetle - beetle excluder. *Am. Potato J.* **1993**, *70*, 903–908.

Müller, H.J. The behaviour of *Aphis fabae* in selecting its host plants, especially different varieties of *Vicia faba*. *Entomol. Exp. Appl.* **1958**, *1*, 66–72.

Nelson, R. International Plant Pathology: Past and Future Contributions to Global Food Security. *Phytopathology.* **2020**, *110*, 245–253, doi:10.1094/PHYTO-08-19-0300-IA.

Nicetic, O.; Cho, Y.R.; Rae, D.J. Impact of physical characteristics of some mineral and plant oils on efficacy against selected pests. *J. Appl. Entomol.* **2010**, *135*, 204–213, doi:10.1111/j.1439-0418.2010.01553.x.

Njoroge, T.M.; Berenbaum, M.R. Laboratory Evaluation of Larvicidal and Oviposition Deterrent Properties of Edible Plant Oils for Potential Management of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in Drinking Water Containers. *J. Med. Entomol.* **2019**, *56*, 1055–1063, doi:10.1093/jme/tjz021.

Northover, J.; Schneider, K.E. Activity of Plant Oils on Diseases Caused by *Podosphaera leucotricha*, *Venturia inaequalis*, and *Albugo occidentalis*. *Plant Dis.* **1993**, *77*, 152–157, doi:10.1094/PD-77-0152.

Northover, J.; Schneider, K.E. Physical Modes of Action of Petroleum and Plant Oils on Powdery and Downy Mildews of Grapevines. *Plant Dis.* **1996**, *80*, 544–550.

Northover, J.; Timmer, L.W. Control of plant diseases with petroleum- and plant-derived oils. In: *Spray Oils Beyond 2000*, Sustainable Pest and Disease Management; Beattie, G.A.C., Watson, D.M., Stevens, M.L., Rae, D.J., Spooner-Hart, R.N., Eds.; University of Western Sydney: Sydney, Australia, **2002**, pp. 512–526, ISBN: 1863419020.

Obeng-Ofori, D. Plant oils as grain protectants against infestations of *Cryptolestes pusillus* and *Rhyzopertha dominica* in stored grain. *Entomol. Exp. Appl.* **1995**, *77*, 133–139, doi:10.1111/j.1570-7458.1995.tb01993.x.

Oerke, E.-C.; Steiner, U. Hyperspectral imaging reveals small-scale water gradients in apple leaves due to minimal cuticle perforation by *Venturia inaequalis* conidiophores. *J. Exp. Bot.* **2024**, *75*, 3125–3140, doi:10.1093/jxb/erae065.

Oyman, Z.O.; Ming, W.; van der Linde, R. Oxidation of drying oils containing non-conjugated and conjugated double bonds catalyzed by a cobalt catalyst. *Prog. Org. Coat.* **2005**, *54*, 198–204, doi:10.1016/j.porgcoat.2005.06.004.

Patterson, R.; Ramirez, R. Aphid Natural Enemies and Biological Control. Utah Pests, Extension Utah State University. **2016**.

Pavela, R. History, presence and perspective of using plant extracts as commercial botanical insecticides and farm products for protection against insects—a review. *Plant Prot. Sci.* **2016**, *52*, 229–241, doi:10.17221/31/2016-PPS.

Pehlevan, B.; Kovanci, O.B. Laboratory Assay of Toxicity and Oviposition Deterrence of Selected Vegetable Seed Oils Against *Cacopsylla pyricola* (Homoptera: Psyllidae). *J. Entomol. Sci.* **2018**, *53*, 192–204, doi:10.18474/JES17-48.1.

Pencreac'h, G.; Graille, J.; Pina, M.; Verger, R. An ultraviolet spectrophotometric assay for measuring lipase activity using long-chain triacylglycerols from *Aleurites fordii* seeds. *Anal. Biochem.* **2002**, *303*, 17–24, doi:10.1006/abio.2001.5427.

Peñuelas, J.; Filella, I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends Plant Sci.* **1998**, *3*, 151–156, doi:10.1016/S1360-1385(98)01213-8.

Peñuelas, J.; Filella, I.; Biel, C.; Serrano, L.; Savé, R. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *Int. J. Remote Sens.* **1993**, *14*, 1887–1905, doi:10.1080/01431169308954010.

Peñuelas, J.; Filella, I.; Gamon, J.A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol.* **1995**, *131*, 291–296.

Perlak, F.J.; Stone, T.B.; Muskopf, Y.M.; Petersen, L.J.; Parker, G.B.; McPherson, S.A.; Wyman, J.; Love, S.; Reed, G.; Biever, D.; Fischhoff, D.A. Genetically improved potatoes - protection from damage by Colorado potato beetles. *Plant Mol. Biol.* **1993**, *22*, 313–321, doi:10.1007/BF00014938.

Petit, A.-N.; Fontaine, F.; Vatsa, P.; Clément, C.; Vaillant-Gaveau, N. Fungicide impacts on photosynthesis in crop plants. *Photosynth. Res.* **2012**, *111*, 315–326, doi:10.1007/s11120-012-9719-8.

Petry, M.; Pude, R.; Kraska, T. Verfahren zur Herstellung eines Pflanzenbehandlungsmittels und Verfahren zur Behandlung von Pflanzen. DE102017000110A1; EP3568014A1, **2017**. Online verfügbar: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DEP3568014A1> (Stand: 19.08.2024).

Pingali, P.L. Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2012**, *109*, 12302–12308, doi:10.1073/pnas.0912953109.

Rabideau, G.S.; French, C.S.; Holt, A.S. The Absorption and Reflection Spectra of Leaves, Chloroplast Suspensions, and Chloroplast Fragments as Measured in an Ulbricht Sphere. *Am. J. Bot.* **1946**, *33*, 769–777.

Rafiee-Dastjerdi, H.; Khorrami, F.; Nouri Ganbalani, G.; Fathi, A.A.; Esmailpour, B. Efficacy of some medicinal plant extracts and essential oils against Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera: Chrysomelidae). *Arch. Phytopathol. Plant Prot.* **2014**, *47*, 1175–1178, doi:10.1080/03235408.2013.833748.

Rajput, L.B.; Gilal, A.A.; Bukero, A.; Wahocho, N.A. Impact of Different Oils as Biopesticide against sucking Insect Pests in Cotton. *J. Basic Appl. Sci.* **2017**, *13*, 34–40, doi:10.6000/1927-5129.2017.13.06.

Raßmann, W. Insektizid-Resistenz bei Blattläusen. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*. Kommissionsverlag Paul Parey: Berlin & Hamburg, **1973**, 149.

Raven, P.H.; Evert, R.F.; Eichhorn S.E. Kapitel 7 Photosynthese, Licht und Leben. In: *Biologie der Pflanzen*; 4. Auflage. Friedl, T., Gillet, E., Komor, E., Langenfeld-Heyser, R.,

Pfanz, H., Uhlarz, H., Eds.; Walter de Gruyter: Berlin, New York. **2006**, pp. 134–160, ISBN: 3110185318.

Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden. *EU Richtlinie 2009/128/EG*, **2009**. Online verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0128> (Stand: 18.08.2024).

Riley, C.V. Seven Annual Report on the Noxious, Beneficial, and Other Insect of the State of Missouri; Regan & Carter: Jefferson City, MS, USA, **1875**.

Ríos, J.L. Chapter 1 - Essential Oils: What They Are and How the Terms Are Used and Defined. In: *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*; Preedy, V.R., Ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, **2016**, pp. 3–10, ISBN: 978-0-12-416641-7.

Ropek, D.; Kołodziejczyk, M. Efficacy of Selected Insecticides and Natural Preparations Against *Leptinotarsa decemlineata*. *Potato Res.* **2018**, 62, 85–95, doi:10.1007/s11540-018-9398-8.

Roth, L.; Kormann, K. *Atlas of oil plants and vegetable oils*; 1st ed. AgriMedia: Bergen/Dumme, Germany. **2005**, ISBN: 9783862630196.

Roth, L.; Kormann, K. *Ölpflanzen – Pflanzenöle*. ecomed verlagsgesellschaft AG & Co. KG: Landbergs, Deutschland. **2000**, ISBN-13: 978-3609687001.

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W.; Harlan, J.C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA. Type III-Final Report, Greenbelt, MD, USA. **1974**.

Sablon, L.; Dickens, J.C.; Haubrugge, E.; Verheggen, F. Chemical Ecology of the Colorado Potato Beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae) and Potential for Alternative Control Methods. *Insects.* **2013**, 4, 31–54.

Sanauallah, M.; Usman, M.; Wakeel, A.; Cheema, S.A.; Ashraf, I.; Farooq, M. Terrestrial ecosystem functioning affected by agricultural management systems: A review. *Soil Tillage Res.* **2020**, 196, doi:10.1016/j.still.2019.104464.

Schaumberger, A.; Schellberg, J.; Hollberg, J. Spektrometrie – moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen. Bericht zum 20. Alpenländischen Expertenforum „Bedeutung und Funktionen des Pflanzenbestandes im Grünland“, HBLFA: Raumberg-Gumpenstein, **2015**, pp. 23–32, ISBN: 13: 978-3-902849-29-8.

Schmutterer, H. Niempräparate (Neem, Nim). In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005**, pp. 171–196, ISBN: 3800147548.

Schönbeck, F.; Steiner, U.; Kraska, T. Induzierte Resistenz: Kriterien, Mechanismen, Anwendung und Bewertung. *J. Plant Dis. Prot.* **1993**, 100, 541–557.

Schooler, S.S.; De Barro, P.; Ives, A.R. The potential for hyperparasitism to compromise biological control: Why don't hyperparasitoids drive their primary parasitoid hosts extinct? *Biological Control.* **2011**, 58, 167–173, doi:0.1016/j.biocontrol.2011.05.018.

Schwartz, H.F.; Peairs, F.B. Integrated Pest Management. In: *Common Bean Improvement in the Twenty-First Century. Developments in Plant Breeding*; Singh, S.P., Ed.; Vol. 7, Springer: Dordrecht, **1999**, pp.371–388, doi:10.1007/978-94-015-9211-6_14.

Scott, E.W.; Abbott, W.S.; Dudley, J.E. *Results of Experiments with Miscellaneous Substances against Bed Bugs, Cockroaches, Clothes Moths and Carpet Beetles*. Bulletin of the US Department of Agriculture. **1918**.

Sharma, N.; Sharma, S.; Gupta, S.; Sharma, M. Evaluation of fungicides against bean rust (*Uromyces appendiculatus*). *Pl. Dis. Res.* **2018**, 33, 174–179.

Signorelli, S.; Casaretto, E.; Millar, A.H. Green Index: a widely accessible method to quantify greenness of photosynthetic organisms. **2023**, doi:10.1101/2023.08.23.554481.

Smolyar, N. Bildgebende Spektroskopie an Pflanzenblättern. Universität Heidelberg, Dissertation. **2003**.

Snyder, W.E.; Ives, A.R. Generalist predators disrupt biological control by a specialist parasitoid. *Ecol. Appl.* **2001**, 82, 705–716, doi:10.1890/0012-9658(2001)082[0705:GPDBCB]2.0.CO;2.

Solbreck, C. Migration, Diapause, and Direct Development as Alternative Life Histories in a Seed Bug, *Neocoryphus bicrucis*. In: *Evolution of Insect Migration and Diapause*; Dingle, H. Ed.; Springer: New York, Heidelberg, Berlin, **1978**, pp. 195–217, doi:10.1007/978-1-4615-6941-1_9.

Soucek, M.D.; Khattab, T.; Wu, J. Review of autoxidation and driers. *Prog. Org. Coat.* **2012**, 73, 435–454, doi:10.1016/j.porgcoat.2011.08.021.

Spotts, R.A.; Ferree, D.C. Photosynthesis, Transpiration, and Water Potential of Apple Leaves Infected by *Venturia inaequalis*. *Phytopathol.* **1979**, 69, 717–719.

Stamford, J.D.; Violet-Chabrand, S.; Cameron, I.; Lawson, T. Development of an accurate low cost NDVI imaging system for assessing plant health. *Plant Methods.* **2023**, 19, 1–19, doi:10.1186/s13007-023-00981-8.

Statistisches Bundesamt. Anbauflächen, Hektarerträge und Erntemengen ausgewählter Anbaukulturen im Zeitvergleich. **2022**. Online verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/liste-feldfruechte-zeitreihe.html> (Stand: 01.10.2022).

Stavely, J.R. Pathogenic variability, resistance sources, and progress towards developing stable resistance to bean rust. *Annu. Rep. Bean Improv. Coop.* **1986**, 29, 24–25.

Stein, W. Pyrethrumpräparate (Pyrethrine). In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005a**, pp. 140–158, ISBN: 3800147548.

Stein, W. Quassia-, Rotenon- und Knoblauchpräparate. In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005b**, pp. 159–170, ISBN: 3800147548.

Steyn, W.J.; Wand, S.J.E.; Holcroft, D.M.; Jacobs, G. Anthocyanins in vegetative tissues: a proposed unified function in photoprotection. *New Phytol.* **2002**, 155, 349–361, doi:10.1046/j.1469-8137.2002.00482.x.

Suresh, S.K.; Suresh, P.V.; Kudre, T.G. 4 - Prospective ecofuel feedstocks for sustainable production. In: *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, 1st ed.; Azad, K., Ed.; Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier: Duxford, United Kingdom, Cambridge, United States, **2019**, pp. 89–117, ISBN: 9780081027776.

- Tanaka, Y.; Sasaki, N.; Ohmiya, A.** Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *Plant J.* **2008**, *54*, 733–749, doi:10.1111/j.1365-313X.2008.03447.x.
- Thenot, F.; Méthy, M.; Winkel, T.** The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *Int. J. Remote Sens.* **2002**, *23*, 5135–5139.
- Thomas, A.; Matthäus, B.; Fiebig, H.-J.** Fats and Fatty Oils. In: *Ullmann's Food and Feed*; Ullmann, F., Elvers, B., Eds.; Wiley-VCH Verlag: Weinheim, Deutschland. **2015**, pp. 651–734, ISBN: 9783527695522.
- Tilman, D.; Cassman, K.G.; Matson, P.A.; Naylor, R.; Polasky, S.** Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature.* **2002**, *418*, 671–677, doi:10.1038/nature01014.
- Tomazoni, E.Z.; Pauletti, G.F.; da Silva Ribeiro, R.T.; Moura, S.; Schwambach, J.** In vitro and in vivo activity of essential oils extracted from *Eucalyptus staigeriana*, *Eucalyptus globulus* and *Cinnamomum camphora* against *Alternaria solani* Sorauer causing early blight in tomato. *Sci. Hortic.* **2017**, *223*, 72–77, doi:10.1016/j.scienta.2017.04.033.
- Turan, S.; Tripathy, B.C.** Salt-stress induced modulation of chlorophyll biosynthesis during de-etiolation of rice seedlings. *Physiol. Plant.* **2015**, *153*, 477–491, doi:10.1111/ppl.12250.
- Tyihák, E.; Steiner, U.; Schönbeck, F.** Induction of Disease Resistance by N^ε-Trimethyl-L-Lysine in Bean Plants against *Uromyces phaseoli*. *J. Phytopathol.* **1989**, *126*, 253–256, doi:10.1111/j.1439-0434.1989.tb01112.x.
- Umweltbundesamt (UBA).** Pflanzenschutzmittel in der Umwelt. **2023**. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien/pflanzenschutzmittel-in-der-umwelt#--2> (Stand: 18.08.2024).
- Unal, G.; Jepson, P.C.** The toxicity of aphicide residues to beneficial invertebrates in cereal crops. *Ann. Appl. Biol.* **1991**, *118*, 493–502. doi:10.1111/j.1744-7348.1991.tb05339.x.
- Vandenborre, G.; Van Damme, E.; Smagghe, G.** Natural Products: Plant Lectins as Important Tools in Controlling Pest Insects. In: *Biorational Control of Arthropod Pests: Application and Resistance Management*; Ishaaya, I., Horowitz, A.R., Eds.; Springer: Dordrecht Heidelberg London New York, **2009**, pp. 163–187, ISBN: 978-94-007-9168-8.
- Vanderplank, J.E.** Disease resistance in plants. Academic Press Inc.: New York. 2nd Ed. **1984**.
- Verordnung (EG) Nr. 1107/2009** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414/EWG des Rates. *EU Verordnung (EG) Nr. 1107/2009*, **2009**. Online verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1107/oj> (Stand: 18.08.2024).
- Verreet, J.-A.; Dehne, H.-W.** Pilze. In: *Lehrbuch der Phytomedizin*; Poehling H.M., Verreet, J.-A. Eds.; 4. Auflage, Eugen Ulmer KG: Stuttgart, **2013**, pp. 136–195, ISBN: 9783800151646.
- Vincent, C.; Fleurat-Lessard, F.; Hallman, G.; Panneton, B.** Management of Agricultural Insects with Physical Control Methods. *Annu. Rev. Entomol.* **2002**, *48*, 261–281.
- Voss, R.H.; Ferro, D.N.** Phenology of Flight and Walking by Colorado Potato Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) Adults in Western Massachusetts. *Environ. Entomol.* **1990**, *19*, 117–122, doi:10.1093/ee/19.1.117.

- Ware, G.W.** *The Pesticide Book*; 4th ed. Fresno: Thomson Publications, **2000**, ISBN: 0913702633.
- Weber, D.C.; Ferro, D.N.; Buonaccorsi, J.; Hazzard, R.V.** Disrupting spring colonization of Colorado potato beetle to nonrotated potato fields. *Entomol. Exp. Appl.* **1994**, 73, 39–50.
- Weiher, N.; Kühne, S.; Böhm, H.; Heimbach, U.; Hoffmann, H.; Moll, E.** Regulierung von Rapsschädlingen im ökologischen Landbau mit neem- und pyrethrumhaltigen Pflanzenschutzmitteln sowie Sonnenblumenöl. *Nachrichtenblatt. Deutscher Pflanzenschutzdienst.* **2007**, 59, 211–216, ISSN: 00277479.
- Weisz, R.; Smilowitz, Z.; Christ, B.** Distance, rotation, and border crops affect Colorado potato beetle (Coleoptera, Chrysomelidae) colonization and population-density and early blight (*Alternaria-solani*) severity in rotated potato fields. *J. Econ. Entomol.* **1994**, 87, 723–72.
- Wratten, S.D.; Gurr, G.M.; Tylanakis, J.M.; Robinson, K.A.**, Cultural control. In: *Aphids as crop pests*; van Emden, H.F., Harrington, R. Eds.; CAB International, **2007**, pp. 423–445, ISBN: 9780851998190.
- Wurms, K., Ah Chee, A.** Product formulation is crucial to the success of lipid based bio-fungicides. *N. Z. Plant Prot.* **2018**, 71, 272–284, doi:10.30843/nzpp.2018.71.124.
- Wynn, W.K.** Appressorium formation over stomates by the bean rust fungus: Response to a surface contact stimulus. *Phytopathol.* **1976**, 66, 136–146, doi:10.1094/Phyto-66-136.
- Yang, X.; Zhang, S.; Li, W.** The performance of biodegradable tung oil coatings. *Prog. Org. Coat.* **2015**, 85, 216–220, doi:10.1016/j.porgcoat.2015.04.015.
- Yang, Y.; Nan, R.; Mi, T.; Song, Y.; Shi, F.; Liu, X.; Wang, Y.; Sun, F.; Xi, Y.; Zhang, C.** Rapid and Nondestructive Evaluation of Wheat Chlorophyll under Drought Stress Using Hyperspectral Imaging. *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, 24, 5825, doi:10.3390/ijms24065825.
- Yuen, G.Y.; Steadman, J.R.; Lindgren, D.T.; Schaff, D.; Jochum, C.** Bean rust biological control using bacterial agents. *Crop Prot.* **2001**, 20, 395–402. doi:10.1016/S0261-2194(00)00154-X.
- Zarco-Tejada, P.J.; Berjón, A.; López-Lozano, R.; Miller, J.R.; Martín, P.; Cachorro, V.; González, M.R.; de Frutos, A.** Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ.* **2005**, 99, 271–287, doi:10.1016/j.rse.2005.09.002.
- Zehnder, G.W.; Hough-Goldstein, J.** Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) population development and effects on yield of potatoes with and without straw mulch. *J. Econ. Entomol.* **1989**, 83, 1982–1987.
- Zhu, F.; Xu, J.J.; Palli, R.; Ferguson, J.; Palli, S.R.** Ingested RNA interference for managing the populations of the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Pest Manag. Sci.* **2011**, 67, 175–182, doi:10.1002/ps.2048.
- Zimmermann, G.** Pilzpräparate. In: *Natürliche Schädlingsbekämpfungsmittel*; Schmutterer, H., Huber, J., Eds.; Ulmer: Stuttgart, **2005**, pp. 87–109, ISBN: 3800147548.
- Zimmermann, G.** Wirkung und Anwendungsmöglichkeiten ätherischer Öle im Pflanzenschutz: Eine Übersicht. *J. Kulturpflanzen.* **2012**, 64, 1–19, ISSN: 1867-0911.
- Zunker, M.; Schneller, H.** Naturstoffe im Pflanzenschutz - Teil 1. *Landinfo.* **2014a**, 4, 18–21.

Zunker, M.; Schneller, H. Naturstoffe im Pflanzenschutz - Teil 2. *Landinfo*. **2014b**, 5, 54–56.

Anhang

Tabelle 13: Stichprobenumfang (n) der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Vegetationsindices (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 4, 6, 8, 10, 12).

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	15	20	20	20	20	20	20	20
Mi	15	19	20	20	20	20	20	20
Cu	14	20	20	20	20	20	19	20
T2	16	20	20	20	20	20	20	20
T1	15	20	20	20	20	20	20	20
L2	17	16	20	20	20	20	20	20
L1	15	20	20	20	20	20	20	20
T2Cu	17	20	20	20	20	20	18	20
T1Cu	16	20	20	20	20	20	20	20
L2Cu	15	20	20	20	19	20	19	20
L1Cu	16	20	20	20	20	19	20	20

Tabelle 14: Stichprobenumfang (n) der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Vegetationsindices (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 5, 7, 9, 11).

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	15	18	20	20	20	18	20	20
Mi	16	20	20	20	20	20	19	20
Cu	16	20	20	20	20	20	20	20
T2	14	19	20	20	20	20	20	20
T1	15	20	20	20	20	20	20	20
L2	19	20	20	20	20	20	20	20
L1	15	20	20	20	20	19	20	20
T2Cu	18	20	20	20	20	20	20	20
T1Cu	17	20	20	20	20	20	20	20
L2Cu	16	20	20	20	19	20	20	20
L1Cu	17	18	20	20	20	20	20	20

Tabelle 15: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der NDVI-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 4). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	a	b	bc	b	cd	c	c
Mi	a	a	ab	ab	a	ab	a	a
Cu	b	b	c	d	c	d	d	d
T2	a	ab	ab	ab	a	a	a	a
T1	a	a	a	a	a	ab	a	a
L2	ab	ab	ab	abc	ab	ab	ab	a
L1	ab	ab	ab	cd	ab	abc	abc	ab
T2Cu	a	a	b	abc	b	bcd	c	c
T1Cu	ab	ab	b	abc	ab	abc	c	c
L2Cu	a	ab	ab	bc	ab	abc	bc	bc
L1Cu	a	ab	b	abc	b	abcd	c	bc

Tabelle 16: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der NDVI-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 5). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	a	ab	ab	abcd	abc	abc	abc
Mi	a	a	ab	a	abc	a	ab	a
Cu	a	a	c	b	d	c	d	d
T2	a	a	ab	a	a	a	abc	ab
T1	a	a	a	a	a	a	abc	a
L2	a	a	a	a	ab	a	a	a
L1	a	a	ab	ab	abcd	ab	abc	abc
T2Cu	a	a	b	a	cd	bc	abcd	cd
T1Cu	a	a	b	ab	abcd	abc	abc	bc
L2Cu	a	a	b	ab	abcd	bc	bcd	abc
L1Cu	a	a	b	ab	bcd	abc	cd	c

Tabelle 17: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der G-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 6). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	b	a	e	d	b	b	cd	d
Mi	a	a	a	a	ab	ab	ab	a
Cu	ab	a	e	bcd	ab	b	d	d
T2	ab	a	cde	bcd	ab	ab	abcd	bcd
T1	b	a	cde	cd	ab	ab	bcd	bcd
L2	ab	a	de	bcd	ab	ab	abc	ab
L1	ab	a	ab	abc	a	a	a	a
T2Cu	b	a	bcde	bcd	ab	ab	ab	a
T1Cu	ab	a	cde	bcd	b	ab	bcd	cd
L2Cu	ab	a	abc	bcd	ab	ab	ab	abc
L1Cu	ab	a	abcd	ab	ab	ab	abcd	bcd

Tabelle 18: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der G-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 7). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	ab	b	ab	a	a	ab	ab
Mi	a	ab	ab	ab	a	a	ab	ab
Cu	a	a	ab	a	a	a	ab	b
T2	a	ab	ab	ab	a	a	ab	b
T1	a	ab	b	b	a	a	b	b
L2	a	ab	ab	ab	a	a	ab	ab
L1	a	ab	a	ab	a	a	ab	a
T2Cu	a	b	ab	ab	a	a	a	a
T1Cu	a	ab	ab	ab	a	a	ab	b
L2Cu	a	ab	ab	ab	a	a	ab	ab
L1Cu	a	ab	ab	ab	a	a	ab	ab

Tabelle 19: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der PRI-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 8). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	a	cd	abc	cd	c	cd	ef
Mi	ab	a	abcd	bcde	ab	a	a	a
Cu	b	a	e	de	d	c	d	f
T2	ab	a	abc	ab	a	a	ab	bc
T1	ab	a	a	a	a	ab	b	bc
L2	ab	a	d	abc	ab	ab	ab	ab
L1	ab	a	cd	bcde	abc	abc	b	bc
T2Cu	ab	a	ab	ab	abc	abc	b	cd
T1Cu	ab	a	cd	cde	abcd	abc	b	de
L2Cu	ab	a	d	e	bcd	bc	b	bcd
L1Cu	ab	a	bcd	abcd	abcd	abc	bc	cd

Tabelle 20: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der PRI-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 9). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	a	bc	ab	a	a	bc	c
Mi	a	a	a	ab	a	a	a	abc
Cu	a	a	c	b	a	a	c	c
T2	a	a	abc	ab	a	a	abc	abc
T1	a	a	abc	a	a	a	bc	abc
L2	a	a	abc	ab	a	a	abc	a
L1	a	a	abc	ab	a	a	ab	ab
T2Cu	a	a	a	a	a	a	ab	abc
T1Cu	a	a	a	ab	a	a	abc	bc
L2Cu	a	a	abc	ab	a	a	abc	abc
L1Cu	a	a	bc	ab	a	a	abc	bc

Tabelle 21: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der ARI1-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 10). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	c	ab	ab	a	ab	ab	a
Mi	a	bc	abc	ab	ab	abc	bcd	cd
Cu	a	ab	abc	a	ab	abc	cde	e
T2	a	bc	abc	ab	ab	ab	ab	a
T1	a	abc	bc	ab	ab	a	a	a
L2	a	abc	a	ab	ab	a	ab	ab
L1	a	abc	abc	ab	ab	ab	abc	bc
T2Cu	a	a	a	a	ab	ab	de	cde
T1Cu	a	bc	abc	b	b	c	e	e
L2Cu	a	ab	abc	ab	ab	ab	de	de
L1Cu	a	abc	c	ab	b	bc	de	e

Tabelle 22: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der ARI1-Werte (PP) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 11). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	ab	ab	abc	e	cd	bc	bcd	bcd
Mi	ab	ab	abc	bcd	abc	abc	abc	abc
Cu	b	ab	d	cde	d	c	e	f
T2	ab	b	ab	e	abc	ab	abc	abc
T1	ab	ab	ab	abc	a	a	ab	ab
L2	ab	ab	a	ab	ab	ab	a	a
L1	ab	ab	abc	bcd	cd	bc	cd	cd
T2Cu	a	a	a	a	abc	ab	cd	de
T1Cu	ab	b	cd	de	bcd	bc	de	def
L2Cu	ab	ab	abcd	abc	abc	abc	de	cde
L1Cu	ab	ab	bcd	abcd	cd	bc	de	ef

Tabelle 23: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der MSI-Werte (QST) nach Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach erster Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Mehrfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.2 (Abbildung 12). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach erster Behandlung)							
	1	4	8	10	15	17	22	24
K	a	a	bc	bc	bcd	ab	cd	d
Mi	a	a	cd	cd	de	de	e	e
Cu	a	a	a	ab	ab	bc	abc	bc
T2	a	a	d	ef	e	de	e	e
T1	a	a	d	ef	e	e	de	e
L2	a	a	cd	f	e	e	e	e
L1	a	a	cd	de	cde	cde	de	de
T2Cu	a	a	bc	ab	ab	ab	a	ab
T1Cu	a	a	ab	a	a	a	ab	a
L2Cu	a	a	bc	bcd	abc	bcd	bc	c
L1Cu	a	a	ab	bcd	ab	ab	ab	bc

Tabelle 24: Stichprobenumfang (n) der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Vegetationsindices (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 13 bis Abbildung 22).

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	12	12	12	11	11	12	10
Mi	-	12	12	12	12	12	12	11
Cu	-	12	11	12	12	12	12	12
T2	-	11	11	11	11	9	11	9
T1	-	12	12	12	12	12	11	12
L2	-	12	12	11	12	11	10	12
L1	-	12	12	12	12	12	12	12
T2Cu	-	12	12	12	12	12	12	12
T1Cu	-	12	11	10	10	10	11	11
L2Cu	-	12	12	12	11	12	12	12
L1Cu	-	12	10	11	10	11	10	11

Tabelle 25: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der NDVI-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 14). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	a	ab	a	ab	a	a
Mi	-	a	a	ab	a	ab	a	a
Cu	-	a	a	ab	a	ab	a	a
T2	-	a	a	ab	a	ab	a	a
T1	-	a	a	ab	a	ab	a	a
L2	-	a	a	a	a	a	a	a
L1	-	a	a	b	a	b	a	a
T2Cu	-	a	a	ab	a	ab	a	a
T1Cu	-	a	a	ab	a	ab	a	a
L2Cu	-	a	a	ab	a	ab	a	a
L1Cu	-	a	a	ab	a	ab	a	a

Tabelle 26: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der G-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 15). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	a	a	a	a	ab	a
Mi	-	a	a	a	a	a	ab	ab
Cu	-	a	a	a	a	a	ab	ab
T2	-	a	a	a	a	a	ab	ab
T1	-	a	a	a	a	a	ab	ab
L2	-	a	a	a	a	a	ab	ab
L1	-	a	a	a	a	a	ab	ab
T2Cu	-	a	a	a	a	a	a	ab
T1Cu	-	a	a	a	a	a	ab	ab
L2Cu	-	a	a	a	a	a	ab	ab
L1Cu	-	a	a	a	a	a	b	b

Tabelle 27: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der PRI-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 16). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	ab	ab	ab	a	ab	a
Mi	-	a	ab	ab	ab	a	ab	a
Cu	-	a	ab	ab	ab	a	ab	a
T2	-	a	ab	ab	b	a	b	a
T1	-	a	ab	b	ab	a	ab	a
L2	-	a	ab	ab	ab	a	ab	a
L1	-	a	b	ab	b	a	ab	a
T2Cu	-	a	a	a	a	a	b	a
T1Cu	-	a	ab	ab	ab	a	a	a
L2Cu	-	a	ab	ab	ab	a	ab	a
L1Cu	-	a	ab	ab	b	a	ab	a

Tabelle 28: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der ARI1-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 17). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	ab	a	a	a	ab	b
Mi	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
Cu	-	a	b	a	a	a	ab	ab
T2	-	a	ab	a	a	a	a	a
T1	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
L2	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
L1	-	a	a	a	a	a	a	a
T2Cu	-	a	ab	a	a	a	b	ab
T1Cu	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
L2Cu	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
L1Cu	-	a	ab	a	a	a	ab	ab

Tabelle 29: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Lic2-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 18). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	a	a	a	a	b	a
Mi	-	a	a	a	a	a	b	a
Cu	-	a	a	a	a	a	b	a
T2	-	a	a	a	a	a	b	a
T1	-	a	a	a	a	a	b	a
L2	-	a	a	a	a	a	b	a
L1	-	a	a	a	a	a	b	a
T2Cu	-	a	a	a	a	a	a	a
T1Cu	-	a	a	a	a	a	ab	a
L2Cu	-	a	a	a	a	a	ab	a
L1Cu	-	a	a	a	a	a	ab	a

Tabelle 30: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der Ctr2-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 19). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
Mi	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
Cu	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
T2	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
T1	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
L2	-	a	a	b	a	b	ab	a
L1	-	a	a	a	a	a	a	a
T2Cu	-	a	a	ab	a	ab	b	a
T1Cu	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
L2Cu	-	a	a	ab	a	ab	ab	a
L1Cu	-	a	a	ab	a	ab	ab	a

Tabelle 31: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der R1480/R2135-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 20). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
Mi	-	a	b	a	a	a	ab	ab
Cu	-	a	ab	a	a	a	a	ab
T2	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
T1	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
L2	-	a	ab	a	a	a	a	a
L1	-	a	ab	a	a	a	ab	ab
T2Cu	-	a	ab	a	a	a	a	ab
T1Cu	-	a	b	a	a	a	ab	b
L2Cu	-	a	a	a	a	a	ab	ab
L1Cu	-	a	ab	a	a	a	b	ab

Tabelle 32: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der R1500/R2250-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 21). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	ab	abc	a	a	b	d	a
Mi	-	ab	c	a	a	ab	bcd	a
Cu	-	a	abc	a	a	ab	abcd	a
T2	-	ab	abc	a	a	ab	bcd	a
T1	-	ab	abc	a	a	ab	abcd	a
L2	-	ab	ab	a	a	ab	abcd	a
L1	-	b	abc	a	a	ab	abcd	a
T2Cu	-	ab	ab	a	a	ab	a	a
T1Cu	-	ab	bc	a	a	ab	ab	a
L2Cu	-	ab	a	a	a	a	abc	a
L1Cu	-	ab	abc	a	a	ab	cd	a

Tabelle 33: Homogene Untergruppen der durchgeführten ANOVA (Post-Hoc-Test) der MSI-Werte (QST) nach Einfachbehandlung von Apfelsämlingen bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Einfachbehandlung von Apfelsämlingen in Kapitel A 3.2.3 (Abbildung 22). ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bezogen auf den jeweiligen Messtermin.

Variante	Messtermin (Tage nach Behandlung)							
	7	10	14	17	21	24	28	31
K	-	a	a	a	a	a	a	a
Mi	-	ab	a	a	a	a	a	b
Cu	-	ab	a	a	a	a	a	ab
T2	-	ab	a	a	a	a	a	ab
T1	-	b	a	a	a	a	a	ab
L2	-	ab	a	a	a	a	a	b
L1	-	ab	a	a	a	a	a	ab
T2Cu	-	ab	a	a	a	a	a	ab
T1Cu	-	ab	a	a	a	a	a	b
L2Cu	-	ab	a	a	a	a	a	b
L1Cu	-	ab	a	a	a	a	a	b

Tabelle 34: Standardabweichung (SD) der Versuche zur Mortalität larvaler Kartoffelkäfer bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Mortalität larvaler Kartoffelkäfer in Kapitel C 3.1 (Abbildung 29).

Variante	protektiv			kurative		
	Tage nach Behandlung			Tage nach Behandlung		
	1	2	3	1	2	3
Kontrolle	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rapsöl	0,00	31,55	28,87	0,00	9,62	8,33
Leinöl	0,00	8,33	8,33	0,00	8,33	21,51
Tungöl	0,00	0,00	0,00	8,33	20,97	13,61

Tabelle 35: Standardabweichung (SD) der Versuche zur Mortalität adulter Kartoffelkäfer bezogen auf den jeweiligen Messtermin (Tage nach Behandlung). Darstellung der zugehörigen Ergebnisse der Mortalität adulter Kartoffelkäfer in Kapitel C 3.1 (Abbildung 30).

Variante	protektiv				kurative			
	Tage nach Behandlung				Tage nach Behandlung			
	1	2	3	6	1	2	3	6
Kontrolle	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rapsöl	0,00	0,00	0,00	23,94	0,00	12,50	25,00	20,41
Leinöl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,50	14,43	14,43
Tungöl	12,50	12,50	12,50	20,41	14,43	14,43	20,41	45,64

Danksagung

Zum Schluss möchte ich mich noch bei allen bedanken, die mich während meiner Promotionszeit und während der Anfertigung meiner Arbeit begleitet und vor allem unterstützt haben.

Ein großer Dank geht an Prof. Dr. Ralf Pude, der es mir durch seine Betreuung und Unterstützung ermöglicht hat, mein Promotionsprojekt am Institut durchzuführen. Vielen Dank für die Begutachtung meiner Arbeit.

Danken möchte ich auch PD Dr. Ulrike Steiner, für die hilfreichen Anregungen, die generelle Unterstützung und für die Begutachtung meiner Arbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Thorsten Kraska, der mich dazu motiviert hat das Promotionsprojekt zu schreiben und mich bei der DBU für ein Stipendium zu bewerben. Vielen Dank für die konstruktive Kritik und die gesamte Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Ebenso bedanke ich mich ausdrücklich bei Dr. Katharina Luhmer, für die hilfreichen Anregungen, die konstruktive Kritik bei der Umsetzung dieser Arbeit und für die Motivation, diese Arbeit zu finalisieren.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Gartenbauwissenschaften bedanken, die mich bei meinen Versuchen vor Ort unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt den Versuchstechnikern des Campus Klein-Altendorf, vor allem für die Hilfe bei der Umsetzung meiner Versuche. Auch bei den übrigen Mitarbeitern und Doktoranden möchte ich mich ausdrücklich für die gemeinsame, prägende Zeit am Campus bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studierenden, die durch ihre Abschlussarbeiten und Tätigkeiten als WHK und SHK an einigen Versuchen mitgewirkt haben. Ein besonderer Dank gilt dabei Tim Boenigk, Jennifer Hillmer, Kathrin Kramer, Christina Schmidt und Laura Winzen, die mit ihren Abschlussarbeiten Teile der hier dargestellten Versuche begleitet haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern, bedanken, die mich immer ohne zu zögern unterstützt haben.

Lukas, vielen Dank für deine ganze Geduld, deine Motivation und einfach dafür, dass du immer für mich da bist.