Aus dem Fachgebiet Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz

des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften

der Georg-August-Universität Göttingen

Modellierung der Wirkungsdauer von Getreidefungiziden und deren Implementierung in Online-Entscheidungshilfen unter besonderer Berücksichtigung von Zymoseptoria tritici

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Fakultät für Agrarwissenschaften

der Georg - August - Universität Göttingen

vorgelegt von

Sandra Greiner

geboren in Soest

Göttingen, im Dezember 2014

D7

- 1. Referent: Prof. Dr. Andreas von Tiedemann
- 2. Korreferent: Prof. Prof. Dr. Bernd Freier

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Februar 2015

"Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuwerfen."

- Albert Einstein -

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung			1					
	1.1	Proble	mstellung	und Ziel der Arbeit	1					
	1.2 Eigenschaften von Fungiziden									
		1.2.1	Kontaktf	ungizide	2					
		1.2.2	Systemis	che Fungizide	3					
	1.3	Fungiz	ide Wirks	toffe im Getreideanbau	4					
		1.3.1	Chlortha	lonil	7					
		1.3.2	Epoxico	nazol	7					
		1.3.3	Fluxapyr	oxad	9					
	1.4	Wirku	ngsdauer v	on Fungiziden und Abbau auf und in der Pflanze	9					
		1.4.1	Abiotisc	he Einflussfaktoren	11					
			1.4.1.1	Evaporation	11					
			1.4.1.2	Niederschlag	12					
			1.4.1.3	Temperatur	12					
			1.4.1.4	Sonnenlicht/UV-Strahlung	13					
			1.4.1.5	Co-Destillation	14					
			1.4.1.6	Guttation	15					
		1.4.2	Biotische	e Einflussfaktoren	15					
	1.5	Epider	niologie d	er untersuchten Weizenpathogene	17					
		1.5.1	Zymosep	toria tritici	17					
		1.5.2	Puccinia	triticina	19					
2	Mat	erial un	d Method	len	22					
	2.1	Freilar	dversuche	;	22					
		2.1.1	Boniturs	chema	22					
		2.1.2	Parzeller	versuche zur Wirkungsdauer	23					
			2.1.2.1	Parzellenversuche 2012	24					
			2.1.2.2	Parzellenversuche 2013	24					
			2.1.2.3	Parzellenversuche 2014	27					
			2.1.2.4	Blattsegmenttest zur Bestimmung der Fungizidwirkungs-						
				dauer gegen Puccinia triticina	28					

Inhaltsverzeichnis

		2.1.3	Validieru	ngsversuche	30
		2.1.4	Halbfreil	andversuche zur Fungizidwirkungsdauer in Abhängigkeit	
			vom Nie	derschlag	31
			2.1.4.1	Halbfreilandversuch 2013	36
			2.1.4.2	Halbfreilandversuch 2014	40
		2.1.5	Halbfreil	andversuch zur Kurativwirkung	42
	2.2	Labory	versuche.		44
		2.2.1	Fungizid	wirkung in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration	44
		2.2.2	Fungizid	wirkungsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur	45
	2.3	Statist	ische Ausv	vertung	46
	2.4	Model	lentwicklu	ng	47
		2.4.1	Berechnu	ng der Infektionswahrscheinlichkeit von Zymoseptoria triti-	
			<i>ci</i>		47
		2.4.2	Berechnu	ung der Fungizidwirkungsdauer	50
			2.4.2.1	Protektive Wirkungsdauer	51
			2.4.2.2	Kurative Wirkungsdauer	52
		2.4.3	Einteilun	g der Fungizide in verschiedene Wirkungsgruppen	54
		2.4.4	Methode	zur Modellierung der Fungizidwirkungsdauer	54
		2.4.5	Entwickl	ung von Validierungsmethoden	56
			2.4.5.1	Berechnete Wirkungsdauer	56
			2.4.5.2	Prognostizierte Wirkungsdauer mit dem Modell OPTI-	
				FUNG	57
		2.4.6	Begriffsc	lefinitionen	58
•	Б				(0)
3	Erge	ebnisse			60 60
	3.1	Wirku	ngsdauer 1	n Abhängigkeit vom Niederschlag	60
	3.2	Wirku	ng und Wi	rkungsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur	61
	3.3	Halbw	ertszeiten		65
	3.4	Charal	sterisierung	g des Modells OPTIFUNG	66
		3.4.1	Infektion	swahrscheinlichkeit von Zymoseptoria tritici	67
		3.4.2	Protektiv	e Wirkungsdauer	69
			3.4.2.1	Berechnete Wirkungsdauer gegen Zymoseptoria tritici	71
			3.4.2.2	Berechnete Wirkungsdauer gegen <i>Puccinia triticina</i>	73
		3.4.3	Kurative	Wirkung	74
		3.4.4	Gebildet	e Wirkungsgruppen	76
		3.4.5	Modellie	rung der Fungizidwirkungsdauer	78
	_	3.4.6	Verknüpf	fung des Modells OPTIFUNG mit bestehenden Modellen .	81
	3.5	Validie	erung des M	Modells OPTIFUNG	82
		3.5.1	Berechne	ete Wirkungsdauer	82

Inhaltsverzeichnis

		3.5.2 Prognostizierte Wirkungsdauer	86
	3.6	Darstellung des Modells OPTIFUNG in isip	90
4	Disk	kussion	93
	4.1	Methode zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer	93
	4.2	Wirkungsdauer und Modellparameter für Zymoseptoria tritici	94
	4.3	Wirkungsdauer und Modellparameter für Puccinia triticina	108
	4.4	Halbwertszeiten der Fungizide	109
	4.5	Weiterer Forschungsbedarf	111
	4.6	Ausblick - Nutzung des Modells OPTIFUNG in der Praxis	115
5	Zusa	ammenfassung	116
5 Ar	Zusa	ammenfassung g	116 137
5 Ar	Zusa hang 1	ammenfassung g Versuchsmaterialien und -geräte	116137137
5 Ar	Zusa hang 1	ammenfassung g Versuchsmaterialien und -geräte	116137137137
5 Ar	Zusa Ihang 1	ammenfassung g Versuchsmaterialien und -geräte 1.1 Chemikalien 1.2	 116 137 137 137 137
5 Ar	Zusa hang 1	ammenfassung Versuchsmaterialien und -geräte 1.1 Chemikalien 1.2 Nährmedien 1.3 Isolate	 116 137 137 137 137 138
5 Ar	Zusa hang 1	ammenfassung y Versuchsmaterialien und -geräte 1.1 Chemikalien 1.2 Nährmedien 1.3 Isolate 1.4	 116 137 137 137 138 139
5 Ar	Zusa hang 1	ammenfassung Versuchsmaterialien und -geräte 1.1 Chemikalien 1.2 Nährmedien 1.3 Isolate 1.4 Verbrauchsmaterial 1.5 Geräte	 116 137 137 137 138 139 140

Abkürzungsverzeichnis

חח	Dreadenhurz
	Drandenburg
BBCH	Code für Phanzen-Entwicklungsstadien (Biologische Bundesanstalt für Land- und
	Forstwirtschaft, <u>B</u> undessortenamt und <u>Ch</u> emische Industrie)
BSA	Bundessortenamt
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
DMI	Demethylase-Inhibitor
EA	Erstauftreten
F, F-x	Bezeichnung der Blattetagen bei Getreide. F = Fahnenblatt, von dort an werden die
	folgenden Blattetagen mit einer Ziffer (-x) benannt
HWZ	Halbwertszeit
ISIP	Informationssystem integrierte Pflanzenproduktion
LTZ	Latenzzeit
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NI	Niedersachsen
NW	Nordrhein-Westfalen
PSD	Pflanzenschutzdienste der Länder
SBI	Sterol-Biosynthese-Inhibitor
SDHI	Succinatdehydrogenase-Inhibitor
SE	Standardfehler (standard error)
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
VG	Versuchsglied
Wdh	Wiederholung
ZEPP	Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im
	Pflanzenschutz

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

L AUT dem "Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutz" soll "die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln [...] auf das notwendige Maß begrenzt werden" (BMELV, 2013). Nach dieser umweltpolitischen Zielsetzung sind Pflanzenschuttmittel nur dann anzuwenden, wenn Bekämpfungsschwellen überschritten wurden oder das Auftreten von Schaderregern prognostiziert wurde. Stattdessen wird die Entscheidung zur Durchführung einer Pflanzenschutzmaßnahme oft auf Grundlage des Entwicklungsstadiums der Pflanzen oder aus arbeitswirtschaftlichen Gründen getroffen. In der Folge werden viele Applikationen unabhängig von Infektionsbedingungen und dem Vorhandensein von Schaderregern durchgeführt.

Für die fachgerechte Bewertung bedeutsamer Entscheidungskriterien, wie beispielsweise die Beurteilung der infektionsgünstigen Bedingungen oder die Festlegung des optimalen Applikationstermins, wurden in der Vergangenheit für verschiedene Kulturen und Schaderreger Prognosemodelle entwickelt und den Beratern und Landwirten zur Verfügung gestellt. Das Prognosemodell "Schaderreger-Infektions-Gefahr" (SIG) zum Beispiel bewertet die Infektionsbedingungen für 23 Pathogene in den fünf wichtigsten Getreidekulturen Winterweizen, Winterroggen, Wintertriticale, Winter- und Sommergerste (Falke und Racca, 2009). Mit dem Prognosemodell SEPTRI ist eine schlagspezifische Prognose von Infektionen mit *Zymoseptoria tritici* auf einzelnen Blattetagen möglich (Erven, 2011). Anhand dieser Informationen kann der optimale Applikationstermin abgeleitet und eine Behandlungsempfehlung ausgegeben werden.

Bisher gibt es jedoch nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen für eine Beurteilung der Prozesse nach der Applikation. Für umweltfreundliche und ressourcenschonende Pflanzenschutzmaßnahmen ist es auch wichtig zu wissen, wann die Wirkung des Pflanzenschutzmittels nicht mehr ausreichend und der Schutz der Kulturpflanze nicht mehr gewährleistet ist.

Um diese Fragen in Zukunft beantworten zu können, war das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines Modells zur objektiven und dynamischen Prognose der Wirkungsdauer von

Fungiziden. Zum Erreichen dieses Ziels mussten die Wirkung und die Wirkungsdauer von Fungiziden zunächst im Labor und im Freiland nach wissenschaftlichen Methoden untersucht werden. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Identifizierung von äußeren Faktoren, die einen Einfluss auf die Wirkungsdauer haben. Der letzte Arbeitsschritt war die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse in ein mathematisches Modell und dessen Validierung.

1.2 Eigenschaften von Fungiziden

1.2.1 Kontaktfungizide

Kontaktfungizide stellen die älteste Fungizidgruppe dar (Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a). Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurde Schwefel als das erste Fungizid entdeckt und für die Bekämpfung von Echtem Mehltau im Obstbau eingesetzt (Kuck et al., 2012a). Ein weiterer Meilenstein war im Jahr 1885 die Einführung der Bordeaux-Brühe zur Bekämpfung von Falschem Mehltau im Weinbau (Hallmann et al., 2009; Kuck et al., 2012a). In den 1930er Jahren wurden organische Stoffe wie Dithiocarbamate und Phthalimide für den Pflanzenschutz entdeckt (Hewitt, 1998a; Kuck et al., 2012a). Zu dieser Gruppe gehören im Getreideanbau zum Beispiel Wirkstoffe wie Phthalonitrile, Folpet und Mancozeb (Leroux et al., 2007).

Kontaktfungizide haben eine protektive Wirkungsweise und werden präinfektionell appliziert (Hallmann et al., 2009). Sie verhindern eine Infektion, indem Entwicklungsphasen des Pilzes wie die Sporenkeimung, die Keimschlauchentwicklung und die Appressorienbildung gehemmt oder unterbunden werden (Copping und Hewitt, 1998). Deshalb werden bei erfolgreicher Anwendung keine Symptome sichtbar. Die Wirkungsweise von Kontaktfungiziden wird als "multi-site" beschrieben, weil sie gleichzeitig mehrere Enzyme und zelluläre Strukturen hemmen (Kuck et al., 2012a; Hewitt, 1998a). Aus diesem Grund handelt es sich häufig um Breitspektrumfungizide (Hewitt, 1998a). Kontaktfungizide sind deshalb auch ein wichtiger Baustein für Anti-Resistenz-Strategien (Copping und Hewitt, 1998; Börner, 2009).

Die Wirkung von Kontaktfungiziden ist von der Ausbringung eines gleichmäßigen, flächendeckenden Spritzbelags auf der Pflanze abhängig, da sie nicht in das Pflanzengewebe eindringen und in der Pflanze immobil sind. Um einen Schutz des Neuzuwachses zu erreichen, müssen sie deshalb in regelmäßigen Abständen angewendet werden (Copping und Hewitt, 1998; Börner, 2009). Neben Kontaktfungiziden gibt es auch systemische Fungizide mit guten protektiven Eigenschaften (Hewitt, 1998a; Copping und Hewitt, 1998).

1.2.2 Systemische Fungizide

Das erste systemische Fungizid war Carboxin und wurde 1966 in den Markt eingeführt (Oerke et al., 1999). Es weist eine Wirkung gegen Basidiomyceten und Rhizoctionia spp. auf (Edgington et al., 1966; von Schmeling und Kulka, 1966) und wird hauptsächlich als Beizmittel angewendet (Oerke et al., 1999). Ende der 1960er/Anfang der 1970er Jahre wurden weitere systemische Fungizide, wie zum Beispiel Benomyl, Thiophanatmethyl und Triadimefon eingeführt (Morton und Staub, 2008; Ivic, 2010). Systemische Fungizide können protektive (siehe 1.2.1), kurative oder eradikative Wirkung haben (Hewitt, 1998a). Kurative Wirkung bedeutet, dass die Nachinfektions- oder Vorsymptomphasen im Infektionsprozess des Pilzes bekämpft werden (Hallmann et al., 2009; Ivic, 2010). Der sichtbare Effekt eines kurativ wirkenden Fungizids ist deshalb der gleiche, wie der eines protektiv wirkenden. Die Zeitspanne, während der das Fungizid wirkt, ist jedoch länger (Hewitt, 1998a; Copping und Hewitt, 1998), wodurch eine größere Flexibilität bei der Wahl des Applikationszeitpunktes gegeben ist (Hallmann et al., 2009). Fungizide mit eradikativer Wirkungsweise wirken gegen die Nachsymptomphasen des Pilzes (Hallmann et al., 2009; Ivic, 2010). Dies können zum Beispiel das externe Myzel oder sporentragende Strukturen sein, die gebildet wurden, nachdem der Pilz sich im Wirt etabliert hat (Copping und Hewitt, 1998).

Bei systemischen Fungiziden handelt es sich meistens um Wirkstoffe, die nur an einem bestimmten Wirkort ansetzen, sogenannte "single-site" Wirkstoffe (Hewitt, 1998a; Copping und Hewitt, 1998). Sie sind in der Lage, die Pflanzenkutikula zu penetrieren und in den Apoplasten oder Symplasten der Pflanze einzudringen (Kuck et al., 2012a). Allerdings besitzen nur wenige Fungizide die chemische Struktur, um den Symplasten zu penetrieren und mit dem Phloemtransportsystem durch Plasmodesmata von Zelle zu Zelle bewegt zu werden (Hewitt, 1998a; Copping und Hewitt, 1998). Die meisten Fungizide haben eine apoplastische Mobilität, das heißt, sie bewegen sich translaminar im Freiraum, den Zellwänden und den Xylemelementen. Die Mobilität wird vor allem durch die Transpirationsrate der Pflanze bestimmt (Hewitt, 1998a). Aus diesem Grund bewegen sich die meisten Fungizide zur Blattspitze hin, wo es zu einer Akkumulation des Wirkstoffs kommen kann. Durch das Wachstum der Blattspitze wird das Fungizid in Gewebe transportiert, die zum Zeitpunkt der Applikation noch nicht vorhanden waren, wodurch ein Schutz des Neuzuwachses möglich ist (Hewitt, 1998a; Börner, 2009). Ein wichtiger Faktor für die Umverteilung in der Pflanze ist außerdem das Level der Gasphasenaktivität. Wirkstoffe, die relativ immobil in der Pflanze sind, können über die Gasphase durch Diffusion in die Pflanze gelangen und flächendeckend umverteilt werden (quasisystemische Wirkstoffe) (Copping und Hewitt, 1998).

1.3 Fungizide Wirkstoffe im Getreideanbau

In diesem Kapitel werden verfügbare Wirkstoffe beziehungsweise Wirkstoffgruppen für den Getreideanbau dargestellt. Besonders berücksichtigt werden die in dieser Arbeit verwendeten Wirkstoffe Chlorthalonil, Epoxiconazol und Fluxapyroxad.

Im Getreideanbau ist der Schutz der Pflanzen gegenüber pilzlichen Schaderregern von besonderer Bedeutung. In Westeuropa werden 41% der eingesetzten Fungizide im Weizen angewendet (Kuck et al., 2012a). Der größte Umsatz bei Fungiziden wird durch die Bekämpfung von neun Hauptpathogenen erzielt (Tab. 1) (Hewitt, 1998b). In Deutschland sind 39% aller zugelassenen Fungizide für den Einsatz in Ackerbau und Grünland bestimmt (Abb. 1 A) (BVL, 2014a). Im Jahr 2013 waren 37% der verkauften Wirkstoffmenge sonstige organische Fungizide (Abb. 1 B). Die zweitgrößte Gruppe mit 21% der abgegeben Wirkstoffmenge bildeten anorganische Fungizide. 18% der gesamten Wirkstoffmenge waren Imidazole und Triazole und 17% Carbamate und Dithiocarbamate.

	Umsatz [Millionen \$]					
Pathogen	Getreid	e Wein	Baumfrüchte	Kartoffeln	geschützter Anbau	Total
Erysiphales	366	201,5	19,4		10,8	597,7
Pucciniaspp.	158,9					158,9
Zymoseptoriaspp.	288,5					288,5
Pseudocercosporella	104,8					104,8
herpotrichoides						
Rhynchosporium	30,1					30,1
secalis						
Plasmopara viticola		330,4				330,4
Botrytis cinerea		44,3	1		6,4	51,7
Phytophthora				103,6	25,2	128,8
infestans						
Venturia inaequlis			67,2			67,2
Total	948,3	576,2	87,6	103,6	42,4	1758,1

Tabelle 1: Umsätze von Fungiziden in Westeuropa, aufgeschlüsselt nach Zielpathogenen und Kulturen (Hewitt, 1998b).

Für den Getreideanbau wurde 1968 die Wirkstoffgruppe der Benzimidazole eingeführt (Cook, 1999; Hallmann et al., 2009). Sie enthält die Wirkstoffe Carbendazim, Benomyl und Thiophanat-Methyl. Hierbei handelt es sich um die ersten systemischen Fungizide mit einem spezifischen Wirkmechanismus (Clark, 2006; Leroux et al., 2007; Kuck et al., 2012a). Die Wirkung der Benzimidazole beruht auf der Hemmung der Zellteilung durch die Bindung an eine makromolekulare Untereinheit der Mikrotubuli (Davidse, 1976). Dieser spezifische Wirkmechanismus förderte die Selektion resistenter Individuen in Pathogenpopulationen (Kuck et al., 2012a), sodass bereits wenige Jahre nach der Einführung der Benzimidazole eine



Abbildung 1: A) Zugelassene Fungizide in Deutschland im Jahr 2013, aufgeschlüsselt nach Anwendungszweck und Einsatzgebiet; B) Anteil der Wirkstoffmengen, die im Jahr 2013 im Inland abgegeben wurden (BVL, 2014a).

Resistenz bei verschiedenen Pathogenen, wie zum Beispiel *Z. tritici*, nachgewiesen wurde (Leroux et al., 2004; Clark, 2006; Fraaije et al., 2007; Mehl und Stenzel, 2008).

Seit 1996/97 wurden Produkte aus der Klasse der Strobilurine mit Wirkstoffen wie Azoxystrobin, Pyraclostrobin oder Trifloxystrobin für die Bekämpfung von Blattkrankheiten in Getreide intensiv genutzt und zur Behandlung von zum Beispiel *Blumeria graminis* und *Mycosphaerella graminicola* eingesetzt (Leroux et al., 2004; Jorgensen und Thygesen, 2006). Die Wirkung von Strobilurinen beruht auf einer Blockade der mitochondrialen Atmungskette des Pathogens am Komplex III (Copping und Hewitt, 1998; Hallmann et al., 2009). Erste resistente *Z. tritici*-Isolate wurden im Jahr 2002 zeitgleich in fünf europäischen Ländern (Irland, Großbritannien, Frankreich, Deutschland, Dänemark) nachgewiesen (Gisi et al., 2004; Leroux et al., 2004; Fraaije et al., 2007). In einem Monitoring, das im Jahr 2003 durchgeführt wurde, wurden in Deutschland bereits 38% der *Z. tritici*-Isolate als resistent eingestuft (Gisi et al., 2004). Auch gegen andere Pathogene wie zum Beispiel *B. graminis* wurden wenige Jahre nach der Markteinführung Resistenzen festgestellt (Jorgensen und Thygesen, 2006; Fraaije et al., 2007; Mehl und Stenzel, 2008).

Eine weitere Gruppe von Fungiziden, die im Getreideanbau angewendet werden, sind die Sterol-Biosynthese-Inhibitoren (SBIs), welche seit Mitte der 1970er Jahre die am häufigsten angewendete Fungizidgruppe bilden (Cools und Fraaije, 2008; Kuck et al., 2012b). Die Wirkung von SBIs basiert auf der Hemmung des pilzspezifischen Sterols Ergosterol, welches in Pflanzen und Tieren nicht vorkommt (Siegel, 1981; Kuck et al., 2012b). Die Synthese von Ergosterol ist eine Eigenschaft der meisten Pilze. Eine Ausnahme bilden niedere Ordnungen wie beispielsweise die Oomyceten, welche das benötigte Sterol über das Myzel direkt von

ihren Wirten aufnehmen (Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a; Kuck et al., 2012b). Aus diesem Grund weisen SBIs keine Wirkung gegen entsprechende Pathogene wie *Plasmopara viticola* und *Phytophthora infestans* auf. Im Getreideanbau werden die ökonomisch bedeutenden Krankheiten jedoch von Ascomyceten und Deuteromyceten verursacht. Aus diesem Grund zählen SBIs zu den wichtigsten Fungiziden (Copping und Hewitt, 1998; Hallmann et al., 2009).

Bei der Bekämpfung von Z. tritici wurden besonders die 14 α -Demethylation-Inhibitoren (DMIs) zur Schlüsselkomponente innerhalb der Gruppe der SBIs (Jorgensen und Thygesen, 2006; Leroux et al., 2007; Kuck et al., 2012b). Bei den meisten registrierten Wirkstoffen aus dieser Gruppe handelt es sich um Triazole mit Wirkstoffen wie Cyproconazol, Epoxiconazol, Metconazol, Tebuconazol und Triadimenol. Daneben gehören aber auch Wirkstoffe wie Pyrifenox, Triflumizole und Prochloraz zu dieser Gruppe (Leroux et al., 2007; Kuck et al., 2012b). In Monitorings wurde festgestellt, dass es in den letzten 20 Jahren einen signifikanten Shift bei der Wirkung von DMIs, wie zum Beispiel bei Tebuconazol, gegeben hat (Clark, 2006; Fraaije et al., 2007; Leroux et al., 2007). Im Gegensatz zu den Benzimidazolen und Strobilurinen wurde bei DMIs bisher jedoch noch keine Feldresistenz berichtet. Das liegt daran, dass die Resistenz gegenüber DMIs auf mehreren Genen beruht ("multigenic"-Resistenz) und nicht wie bei Strobilurinen auf einem einzigen Gen. Aus diesem Grund geht die Selektion resistenter Individuen langsamer vonstatten (Kuck et al., 2012b). Studien in den 2000er Jahren haben gezeigt, dass es eine klare Verringerung der Wirkung gibt und höhere Aufwandmengen für gleiche Wirkungsgrade benötigt werden (Clark, 2006). Weniger effektive Azole erreichen bei hohem Befallsdruck von Z. tritici keine zufriedenstellende Wirkung mehr (Clark, 2006).

Die neueste Fungizidgruppe im Getreideanbau sind die Carboxamide (Jorgensen und Thygesen, 2006; Rheinheimer et al., 2012). Sie gehören zur Gruppe der Succinatdehydrogenase-Inhibitoren (SDHIs). Ihre Wirkung beruht auf der Hemmung der Succinatdehydrogenase (SDH), dem Komplex II der mitochondrialen Atmungskette (Earley, 2012). Dadurch wird der Elektronenfluss in der mitochondrialen Atmung und letztlich auch die Energieproduktion des Pilzes unterbrochen (Earley, 2012). Das 2003 in den Markt eingeführte Boscalid war das erste Carboxamid, das eine Wirkung gegen Ascomyceten hatte (Rheinheimer et al., 2012). Neben Boscalid gehören Wirkstoffe wie Bixafen, Isopyrazam, Penthiopyrad und Fluxapyroxad zu den Carboxamiden. Der Einsatzschwerpunkt von Carboxamiden liegt vor allem auf der Bekämpfung von Z. tritici (Rheinheimer et al., 2012).

1.3.1 Chlorthalonil

Chlorthalonil wurde in dieser Arbeit als Beispiel für ein Kontaktfungizid ausgewählt. Es wurde 1964 von der Firma Diamond Alkali in den Markt eingeführt (Russell, 2005). Chlorthalonil wird in die Gruppe der Phthalonitrile eingeordnet und ist einer der wichtigsten protektiven Fungizidwirkstoffe (Copping und Hewitt, 1998; Russell, 2005; Börner, 2009). Die Strukturformel ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Wirkung beruht auf einer Reaktion mit den Sulfhydryl-Gruppen von Glutathion, Coenzym A und Enzymen (Tillman et al., 1973). Dadurch kommt es zu Blockaden im pilzlichen Stoffwechsel und zur Inaktivierung von Enzymen, sodass die Sporenkeimung gehemmt wird (Tillman et al., 1973; Börner, 2009). Auf Grund seiner "multi-site" Wirkungsweise hat Chlorthalonil ein sehr breites Wirkungsspektrum und ist zum Schutz zahlreicher Kulturen geeignet (Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a). Weltweit ist Chlorthalonil einer der am häufigsten eingesetzten fungiziden Wirkstoffe (Monadjemi et al., 2011). In Deutschland liegen Zulassungen für den Einsatz gegen *Zymoseptoria* spp. in Getreide sowie gegen Krankheiten in Kartoffeln und Spargel vor (BVL, 2014b). Auch nach über 40 Jahren der Anwendung sind noch keine resistenten Pilzstämme nachgewiesen worden (Börner, 2009).



Abbildung 2: Strukturformel von Chlorthalonil (Börner, 2009).

1.3.2 Epoxiconazol

Der Wirkstoff Epoxiconazol wurde in dieser Arbeit als Beispiel für ein Fungizid aus der Gruppe der Azole ausgewählt. Epoxiconazol wurde von der Firma BASF entwickelt und im Jahr 1992 in den Markt eingeführt (Kuck et al., 2012b). Es gehört zur Gruppe der DMIs (siehe Kapitel 1.3) und zählt zur Klasse der Triazole, den kommerziell wertvollsten Fungiziden (Hewitt, 1998a). Die Strukturformel ist in Abbildung 3 zu sehen. Epoxiconazol ist ein systemischer Wirkstoff, dessen Translokation in der Pflanze akropetal im Apoplasten und im Xylem erfolgt (Saur et al., 1991; Börner, 2009). Es besitzt ein breites Wirkungsspektrum gegen viele Getreide-, Obst- und Gemüsepathogene (Copping und Hewitt, 1998; Kuck et al., 2012b). Durch seine guten Aufnahme- und Translokationseigenschaften in der Pflanze kann

es sowohl protektiv als auch kurativ und eradikativ angewendet werden (Saur et al., 1991; Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a; Kuck et al., 2012b).

Der Wirkmechanismus beruht hauptsächlich auf der Hemmung der 14 α -Demethylase, dem Enzym Cytochrom P-450, welches in die Biosynthese von pilzlichem Ergosterol involviert ist. Sterole sind in den Zellmembranen lokalisiert und erhalten die Membranintegrität, indem sie die Permeabilität stabilisieren und kontrollieren (Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a). Im pilzlichen Organismus ist Ergosterol das wichtigste Sterol und unverzichtbarer Bestandteil der Zellmembran (Siegel, 1981; Kuck et al., 2012b). Es hat eine essentielle Rolle in der Aufrechterhaltung der Membranfunktion, sodass eine Reduktion seiner Verfügbarkeit die Membranintegrität unterbricht und zu Elektrolytefflux führt (Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a). Aus der Hemmung der 14α -Demethylase resultieren anormale Pilzstrukturen und eine starke Hemmung des Myzelwachstums auf und im Pflanzengewebe (Saur et al., 1991). Epoxiconazol hat keine Wirkung auf die Sporenkeimung, da diese auf gespeicherten Reserven beruht und unabhängig von der Ergosterolbiosynthese ist (Copping und Hewitt, 1998; Hewitt, 1998a). Eine Studie von Saur et al. (1991) zeigt, dass Epoxiconazol bei protektiver Applikation bis zur Bildung der ersten Infektionsstrukturen keine hemmende Wirkung auf Puccinia recondita und B. graminis hat. An kurativ beziehungsweise eradikativ behandelten Pflanzen hingegen wird die Ausbildung beziehungsweise die Struktur der Haustorien beeinflusst und das Myzelwachstum sehr stark gehemmt. Epoxiconazol verursacht außerdem eine starke Hemmung der Sporogenese. Bei P. triticina kollabieren die Sporen, die Sporenmutterzellen und die Zwischenzellen (Paraphysen), die für das Aufbrechen der Uredosporenlager verantwortlich sind. Bei B. graminis kollabieren alle Oberflächenstrukturen innerhalb von 24 Stunden nach Kontakt mit dem Fungizid (Saur et al., 1991). Mit Epoxiconazol können gute Bekämpfungserfolge gegen B. graminis, Puccinia spp., Z. tritici, Leptosphaeria nodorum, Pyrenophora teres und Rhynchosporium secalis sowie gegen Pseudocercosporella herpotrichoides erzielt werden (Saur et al., 1991; Börner, 2009).



Abbildung 3: Strukturformel von Epoxiconazol (Kuck et al., 2012b).

1.3.3 Fluxapyroxad

Als Beispiel für einen Wirkstoff aus der Gruppe der Carboxamide wurde Fluxapyroxad gewählt. Fluxapyroxad gehört zur Gruppe der SDHIs (siehe Kapitel 1.3) und wurde 2012 von der Firma BASF in den Markt eingeführt (Semar et al., 2011; Rheinheimer et al., 2012). Die Strukturformel ist in Abbildung 4 dargestellt. Neben einer langandauernden protektiven Wirkung besitzt Fluxapyroxad eine hohe systemische Aktivität und eine kurative Wirkung (Semar et al., 2011). Es wird durch seine lipophilen und hydrophilen Eigenschaften systemisch akropetal in der Pflanze verteilt, sodass auch Pflanzenteile geschützt werden, die nicht direkt bei der Applikation getroffen wurden (Semar et al., 2011).

Der Wirkungsmechanismus von Fluxapyroxad beruht auf der Hemmung der mitochondrialen Succinatdehydrogenase (SDH), dem Komplex II (Hewitt, 1998a; Cecchini, 2003; Glättli et al., 2011; Earley, 2012). Das SDH-Enzym ist ein Bindeglied zwischen Atmungskette und Citratzyklus (Krieg et al., 2010; Prochnow et al., 2010). Es koppelt die Oxidation von Succinat zu Fumarat mit der Reduktion von Ubichinon zu Ubichinol (Prochnow et al., 2010; Scalliet et al., 2011; Earley, 2012). Succinat und Fumarat sind Metaboliten im Citratzyklus und in der Matrix der Mitochondrien lokalisiert, wohingegen Ubichinon und seine reduzierte Form Ubichinol hydrophobe Elektronentransporter der Atmungskette im Inneren der Mitochondrienmembran sind (Scalliet et al., 2011). Das SDH Enzym transportiert Elektronen vom Citratzyklus direkt zur Atmungskette und ist somit das einzige Enzym, welches als ganzheitliches Membranprotein arbeitet (Scalliet et al., 2011). Eine Störung dieses Transportes unterbricht die mitochondriale Atmung und letztendlich die Versorgung des Pilzes mit Energie und essentiellen Zellbausteinen aus dem Citratzyklus, zum Beispiel Aminosäuren (Matsson und Hederstedt, 2001; Prochnow et al., 2010).

Fluxapyroxad ist sowohl gegen Ascomyceten als auch gegen Deuteromyceten und Basidiomyceten wirksam und wird gegen Getreidepathogene wie *Z. tritici* eingesetzt, wirkt aber auch gegen ein breites Spektrum von Pathogenen in verschiedenen Ackerbau- und Sonderkulturen (Glättli et al., 2011; Semar et al., 2011).

1.4 Wirkungsdauer von Fungiziden und Abbau auf und in der Pflanze

In diesem Kapitel werden die Wirkungsdauer sowie der Abbau von Fungiziden auf und in der Pflanze beschrieben. Da es schwierig ist, die Dauer der Wirkung und die Persistenz eines



Abbildung 4: Strukturformel von Fluxapyroxad (Rheinheimer et al., 2012).

Fungizids von einer auf eine andere Kultur zu übertragen (Elliott und Spurr, 1993), beschränkt sich dieses Kapitel nur auf verfügbare Informationen für Getreide.

Hewitt (1998a) beschreibt ganz allgemein, dass mobile Fungizide in Getreide "nicht nur etablierte Kolonien bekämpfen sondern, durch Umverteilung Schutz für 28-42 Tage bieten [können], abhängig von Produkt und Zielpathogen". In Exaktstudien wurden etwas kürzere Wirkungszeiträume ermittelt, die aber ungefähr mit der unteren Grenze von 28 Tagen übereinstimmen (Hewitt, 1998a). Eine Studie von Hims und Cook (1991) zeigte, dass Tilt 205 EC (Propiconazol) eine gute protektive Wirkung (70% Wirkungsgrad) gegen P. triticina hat, wenn es 270 Gradtage vor der Infektion appliziert wird. Das entspricht einer Dauer von 21,6 Tagen bei einer angenommenen Tagesdurchschnittstemperatur von 12,5°C. Auch gegen Z. tritici wurde bei protektiver Applikation 200 Gradtage vor der Infektion ein Wirkungsgrad von 60% erreicht, was bei 12,5°C Tagesdurchschnittstemperatur eine Wirkungsdauer von 16 Tagen bedeuten würde. In der gleichen Studie hatte Bravo 500 (Chlorthalonil) einen Wirkungsgrad von 60%, wenn es 190 Gradtage (15,2 Tage bei 12,5°C) vor der Infektion von P. triticina eingesetzt wurde. Bei noch früherer Applikation sank der Wirkungsgrad deutlich auf 35% bei 270 Gradtagen (= 21,6 Tage bei 12,5 °C). Gegen Z. tritici wurde bei protektiver Applikation 200 Gradtage (=16 Tage bei 12,5°C) vor der Infektion ein Wirkungsgrad von 60% erreicht. Elliott und Spurr (1993) schätzen auf Basis von minimalen Wirkkonzentrationen aus der Literatur eine protektive Wirkungsdauer von ca. 24 Tagen für Chlorthalonil.

Im Bezug auf Pflanzenschutzmittel wurden zahlreiche Studien zur Wirkung auf das Pathogen und die Pflanze sowie zu den genauen Wirkmechanismen durchgeführt. Die meisten dieser Studien beschäftigen sich mit dem Einfluss des Fungizids auf die Pathogene und die Pflanzen. Der umgekehrte Aspekt, nämlich der Einfluss von Pathogenen und Pflanzen auf das Fungizid, wurde bisher jedoch nur in sehr wenigen Studien untersucht.

Meistens wurden Studien zum Metabolismus von Pflanzenschutzmitteln in Pflanzen durchgeführt um Daten zu Rückständen im Erntegut zu gewinnen. Diese Daten werden für die Registrierung neuer Wirkstoffe und die Re-Registrierung von Wirkstoffen benötigt (Roberts,

2000). Es wurden viele Studien veröffentlicht, die die Abbauprozesse von Fungiziden im Boden, im Wasser und in der Luft untersuchen. Bis heute gibt es jedoch nur sehr wenige Studien, die sich mit dem Abbau und den Wirkstoffgehalten auf und in der Pflanze während der Vegetationsperiode beschäftigen. Ebenso wenig ist über den Einfluss von Umwelteinflüssen wie Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung auf die Wirkungsdauer von Fungiziden bekannt. Untersuchungen von Hatton et al. (1996) zufolge hat auch das Pflanzenalter einen Einfluss auf die Abbauprozesse in der Pflanze. An Mais wurde gezeigt, dass die Menge des detoxifizierenden Enzyms Glutathion-S-Transferase in jüngeren Pflanzen höher war als in älteren. Das bedeutet, dass Pflanzenschutzmittel in jüngeren Pflanzen schneller abgebaut werden können.

Die fungiziden Wirkstoffe unterscheiden sich nicht nur in ihrer Wirkungsweise auf den pilzlichen Organismus, sondern auch in Bezug auf ihre Abbaumechanismen in und auf der Pflanze. Diese Mechanismen lassen sich in biotische und abiotische Prozesse unterteilen.

1.4.1 Abiotische Einflussfaktoren

1.4.1.1 Evaporation

Der Einfluss von Evaporation auf den Abbau von Fungiziden wurde sowohl für systemische Wirkstoffe als auch für Kontaktwirkstoffe untersucht. Nach Ergebnissen von Angioni et al. (2003a) werden Azole nicht durch Evaporation beeinträchtigt. In einem Modellsystem wurden in Aceton gelöste reine Wirkstoffe auf eine Cellulosemembran aufgetragen und nach dem Trocknen in ein verschlossenes Glas gelegt. Das Glas wurde zunächst für 24 Stunden bei 50°C und dann für 5 Stunden bei -20°C gelagert, sodass das in der Gasphase befindliche Wasser kondensieren konnte. Anhand einer Analyse des Kondenswassers wurde die evaporierte Wirkstoffmenge ermittelt. Untersucht wurden die Wirkstoffe Cyproconazol, Hexaconazol, Penconazol, Propiconazol und Tebuconazol. Auch die Mengen der Wirkstoffe Azoxystrobin, Trifloxystrobin, Pyraclostrobin und Fenamidone wurden in Laborversuchen mit derselben Methode nicht reduziert (Garau et al., 2002, 2009). In dem gleichen Modellsystem reduzierte sich die Wirkstoffmenge von Pyrimethanil ohne künstliche Wachsschicht um 49% durch Evaporation. Mit Wachsschicht jedoch lag die Evaporation bei 0% (Garau et al., 2002). Die Menge von Cyprodinil wurde durch Evaporation um 20% verringert, die von Fludioxonil um 3%. Mit Wachsschicht lag die Evaporation bei beiden Wirkstoffen ebenfalls bei 0% (Garau et al., 2002). In Versuchen von Angioni et al. (2003b) wurde der Kontaktwirkstoff Captan nicht durch Evaporation beeinflusst.

Laut Zongmao und Haibin (1997) ist Evaporation direkt nach der Applikation der wichtigste Schritt bei der Degradation von Fungiziden. Je höher der Dampfdruck des Fungizids ist, desto höher ist nach ihren Angaben auch die Evaporationsrate.

1.4.1.2 Niederschlag

Von Bravo 500 (Chlorthalonil) wurden in Freilandversuchen an Kartoffelpflanzen durch leichte Niederschläge größere Wirkstoffmengen von den oberen auf die unteren Blattetagen umverteilt, als durch starke Niederschläge. Ohne Niederschlag wurde keine Umverteilung des Wirkstoffs festgestellt. Zehn Millimeter Niederschlag am Tag der Applikation entfernten 66% der ursprünglichen Menge an Chlorthalonil. Die gleiche Menge Niederschlag an Tag eins oder sieben nach der Applikation entfernten 55 und 36% der Wirkstoffmenge (Bruhn und Fry, 1982). Auch Zongmao und Haibin (1997) stellten fest, dass die von Blättern abgewaschene Wirkstoffmenge umso geringer ist, desto mehr Zeit zwischen Applikation und Niederschlagsereignis vergangen sind. Elliott und Spurr (1993) stellten ebenfalls in Freilandversuchen fest, dass eine gute Korrelation zwischen der Abbaurate von Bravo 720 (Chlorthalonil) auf Erdnussblättern und der Niederschlagsmenge vorliegt. In Laborversuchen mit Erbsen fanden Szeto et al. (1989) heraus, dass Ronilan 50 WP (Vinclozolin) leicht mit Wasser abgewaschen werden konnte. Durch die tröpfchenweise Applikation von 10 ml Wasser auf behandelte Erbsensämlinge wurden je nach Zeitspanne zwischen Wasser- und Fungizidapplikation (0 bis 50 Tage) 75-95% der Wirkstoffmenge abgewaschen.

Versuchen von Zongmao und Haibin (1997) zufolge ist die Menge, die durch Niederschläge abgewaschen wird, stark von der Wasserlöslichkeit des Wirkstoffs abhängig. Je stärker allerdings das Niederschlagsereignis ist, desto geringer ist diese Abhängigkeit. Bei Niederschlagsereignissen > 15 mm ist die Wasserlöslichkeit des Wirkstoffs nicht mehr ausschlaggebend. Denn bei starken Niederschlägen wird der Wirkstoff hauptsächlich durch mechanische Effekte abgewaschen (Zongmao und Haibin, 1997). Bei formulierten Wirkstoffen kann dieser Effekt durch den Einsatz von Haftmitteln jedoch deutlich reduziert werden (Gent et al., 2003; Ryckaert et al., 2007; Gaskin und Steele, 2009).

1.4.1.3 Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Wirkung beziehungsweise den Abbau von Fungiziden wurde bereits für verschiedene Wirkstoffe untersucht. In Freilandversuchen in Taiwan mit Opus SC (Epoxiconazol) wurde festgestellt, dass die Halbwertszeit des Wirkstoffs bei Durchschnittstemperaturen von 16-20°C im Herbst etwa doppelt so lang war, wie im Frühjahr bei

Durchschnittstemperaturen von 26-29°C (Lin et al., 2001). In Laborversuchen mit anderen Azolen (Cyproconazol, Hexaconazol, Penconazol, Propiconazol, Tebuconazol) konnte ein Abbau durch hohe Temperaturen (Lagerung des Wirkstoffs für 24 h bei 50°C) nicht nachgestellt werden (Angioni et al., 2003a). Garau et al. (2002) und Garau et al. (2009) führten Untersuchungen zu Abbaumechanismen verschiedener Strobilurine im Labor durch. Dazu wurden die in Aceton gelösten reinen Wirkstoffe auf eine Cellulosemembran aufgetragen und bei 50°C für 24 Stunden in einen Ofen gestellt. Die Hitzeperiode hatte keinen Einfluss auf die Mengen von Trifloxystrobin, Pyraclostrobin, Azoxystrobin und Fenamidone auf der Membran. Auch bei den Wirkstoffen Pyrimethanil, Cyprodinil und Fludioxonil konnte kein Einfluss der Temperatur auf den Abbau nachgewiesen werden (Garau et al., 2002).

Die Wirkung von höheren Temperaturen auf Fungizide mit dem Kontaktwirkstoff Chlorthalonil wird in verschiedenen Studien unterschiedlich bewertet. Für Bravo 500 (Chlorthalonil) an Kartoffelblättern wurde berichtet, dass die Abbaurate mit steigender Temperatur zunimmt, wobei der Abbau bei 15°C Tagesdurchschnittstemperatur am geringsten und bei 27°C am stärksten war (Bruhn und Fry, 1982). Auch Brenneman et al. (1990) stellten fest, dass der Abbau von Bravo 500 beziehungsweise 720 (Chlorthalonil) bei Temperaturen von über 18°C beschleunigt war. In Freilandversuchen mit Erdnusspflanzen stellten Elliott und Spurr (1993) hingegen nur eine sehr geringe Korrelation zwischen der Abbaurate von Bravo 720 (Chlorthalonil) und der mittleren Temperatur fest. Durch 24-stündige Lagerung des reinen Wirkstoffs Captan bei 50°C wurde die Menge auf einer Cellulosemembran gegenüber einer Aufbewahrung bei Raumtemperatur signifikant reduziert (Angioni et al., 2003b).

1.4.1.4 Sonnenlicht/UV-Strahlung

Der Abbau von Fungiziden durch Sonnenlicht beziehungsweise UV-Strahlung auf der Oberfläche von Pflanzen nach der Applikation wurde bisher nur selten untersucht. Bentson (1990) und Willis und McDowell (1987) beschreiben die Photodegradation jedoch als Hauptprozess für den Abbau von Pflanzenschutzmitteln auf dem Blatt. Der photochemische Abbau eines Fungizids ist insbesondere in oberflächennahen Bereichen der Pflanzen von Bedeutung. Sobald das Fungizid tiefer in das Pflanzengewebe eingedrungen ist, ist es durch die Kutikula weitgehend vor dem photochemischen Abbau geschützt. In diesen Bereichen wird es überwiegend durch den Metabolismus der Pflanze abgebaut (Monadjemi et al., 2011).

Garau et al. (2002) und Garau et al. (2009) führten mit reinen Wirkstoffen Untersuchungen zum Einfluss des Sonnenlichtes auf den Abbau von Fungiziden durch. Der in Aceton gelöste Wirkstoff wurde in UV-durchlässigen Quarzglaspetrischalen dem Sonnenlicht ausgesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass Photodegradation der Hauptmechanismus für den Abbau der

Wirkstoffe Azoxystrobin, Trifloxystrobin, Pyraclostrobin und Fenamidone ist. Mit derselben Methode untersuchten Angioni et al. (2003a) den Einfluss von Sonnenlicht auf verschiedene Azole mit und ohne künstliches Kutikulawachs. Ohne Wachsschicht wurden die Wirkstoffe Cyproconazol, Hexaconazol, Penconazol, Propiconazol und Tebuconazol mit Halbwertszeiten von 2,0 bis 2,5 Tagen sehr schnell abgebaut. Mit künstlicher Wachsschicht hingegen wurden die Fungizide durch Sonnenlicht wesentlich langsamer abgebaut.

Auch Lin et al. (2001) vermuteten einen schnelleren Abbau des Fungizids Opus SC (Epoxiconazol) durch eine höhere Globalstrahlung. In Freilandversuchen war die Halbwertszeit von Epoxiconazol bei höherer Globalstrahlung (10,2-13,4 μ w/m²) und Temperatur (25,6-28,9°C) nur etwa halb so lang wie bei niedrigerer Globalstrahlung (8,81-9,94 μ w/m²) und Temperatur (16,2-20,0°C). In Versuchen mit Pyrimethanil wurde gezeigt, dass der Abbau unter Glas im Vergleich zum Abbau unter direktem Sonnenlicht - um Faktor fünf reduziert ist (Garau et al., 2002). Für Cyprodinil ermittelten Garau et al. (2002) nur einen geringen Einfluss von UV-Licht auf den Abbau des Wirkstoffs. Als Grund dafür wird die systemische Aktivität von Cyprodinil vermutet, da der Wirkstoff so durch die Kutikula geschützt wird. Für Fludioxonil wurde Photodegradation in den gleichen Versuchen als Hauptabbaumechanismus festgestellt (Garau et al., 2002).

Bei Versuchen mit reinem Chlorthalonil auf Blattsegmenten von Chilipflanzen im Kunststoffgewächshaus und im Freiland wurde herausgefunden, dass sich der Wirkstoff im Gewächshaus langsamer abbaut als im Freiland. Tan et al. (2013) vermuteten, dass dieses Ergebnis einen Hinweis auf den Einfluss von UV-Strahlung auf den Abbau des Fungizids gibt. Auch Monadjemi et al. (2011) vermuteten, dass der Abbau von Chlorthalonil durch photochemischen Abbau bestimmt wird. Für den Wirkstoff Captan wurde Photodegradation ebenfalls als Hauptabbaumechanismus im Labor berichtet (Angioni et al., 2003b).

1.4.1.5 Co-Destillation

Co-Destillation oder Wasserdampfdestillation ist die simultane Destillation von zwei nicht mischbaren flüssigen Phasen. Per Definition ist eine dieser Phasen Wasser und eine andere ist eine organische Substanz, die eine geringe Wasserlöslichkeit aufweist (Mayo et al., 2010).

Versuche zu Fungizidrückständen auf Pfefferminze und in Pfefferminzöl ergaben, dass während der Co-Destillation signifikante Mengen von Tebuconazol (Folicur) und Propiconazol (Tilt) in das Öl mitgerissen wurden (Garland et al., 1999). Angioni et al. (2003a) stellten fest, dass die Wirkstoffmenge verschiedener Azole durch Co-Destillation reduziert werden kann. Die reinen Wirkstoffe wurden auf Filterpapier aufgetragen und über ein mit Wasser gefülltes

Glas gespannt. Der Co-Destillations-Prozess wurde durch die Verdampfung des Wassers hervorgerufen. Der Versuch wurde mit und ohne künstliche Wachsschicht durchgeführt. In Versuchen mit künstlicher Wachsschicht zeigte sich bei Cyproconazol, Hexaconazol, Penconazol, Propiconazol und Tebuconazol durch Co-Destillation eine signifikante Verringerung der Wirkstoffmenge. Ohne künstliche Wachsschicht hingegen wurden die Wirkstoffe nicht durch Co-Destillation beeinträchtigt. Garau et al. (2002) fanden mit der gleichen Versuchsmethode heraus, dass Cyprodinil fast vollständig durch Co-Destillation abgebaut wird. Auch der Wirkstoff Pyrimethanil wird unter anderem durch Co-Destillation abgebaut (Garau et al., 2002). Auf Fludioxonil hatte die Co-Destillation keinen Einfluss (Garau et al., 2002).

Für die Strobilurinwirkstoffe Azoxystrobin, Trifloxystrobin, Pyraclostrobin und Fenamidone wurde in Laborversuchen mit der oben beschriebenen Methode festgestellt, dass der Abbau durch Co-Destillation keine Reduzierung der Wirkstoffmenge hervorruft (Garau et al., 2002, 2009). In Versuchen mit dem reinen Kontaktwirkstoff Captan wurde nach dem Vorgang der Co-Destillation, wie bei den Azolwirkstoffen, eine geringere Menge Wirkstoff gemessen als vorher (Angioni et al., 2003b).

1.4.1.6 Guttation

Pflanzenschutzmittel können unter bestimmten Umständen mit dem Guttationssaft der Pflanze ausgeschieden werden. Der Einfluss von Guttation auf die Wirkstoffmenge von Pflanzenschutzmitteln wurde besonders im Hinblick auf Insektizide untersucht (Thompson, 2010; Tapparo et al., 2011). Für Fungizide wurde dieses Phänomen allerdings auch berichtet. Harris (1999) untersuchte die Rückstände eines experimentellen, xylemmobilen Fungizids sowie von Fluquinconazol im Guttationssaft von Winterweizen in Abhängigkeit von verschiedenen Formulierhilfsstoffen. Beide Fungizide wurden im Guttationssaft nachgewiesen, allerdings hatten die Formulierhilfsstoffe einen großen Einfluss auf die Wirkstoffmenge im Guttationssaft. Die maximale Wirkstoffmenge betrug 15% der applizierten Dosis. Bickers et al. (1999) untersuchten die Menge von Cymoxanil im Guttationssaft von Tomaten. Eineinhalb Tage nach der Applikation wurden je nach Formulierung des Wirkstoffs 0,3 bis 3 ppm Cymoxanil im Guttationssaft nachgewiesen. Acht Tage nach der Applikation konnten immer noch 0,1 bis 1,5 ppm Cymoxanil nachgewiesen werden.

1.4.2 Biotische Einflussfaktoren

Biotische Abbauprozesse von Fungiziden werden hauptsächlich durch den pflanzlichen Stoffwechsel getrieben und sind abhängig von der chemischen Struktur des Wirkstoffs, der Pflan-

zenart, den Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchte, Boden pH, etc.), Mikroorganismen und Stoffwechselfaktoren (Baloch, 2000; Van Eerd et al., 2003).

Die Biotransformation von Pflanzenschutzmitteln in der Pflanze lässt sich in drei Phasen einteilen: die Funktionalisierungsreaktion, die Konjugationsreaktion und die Transportphase (Katagi und Mikami, 2000). In Phase I werden die biologisch aktiven Wirkstoffe in weniger aktive Substanzen umgewandelt (Katagi und Mikami, 2000). Dies geschieht hauptsächlich durch Hydrolyse (Hydrolasen, Esterasen) und Oxidation (Dehydrogenasen) (Katagi und Mikami, 2000) oder Reduktion (Cytochom P450) (Fonné-Pfister et al., 1990). Einige Wirkstoffe werden durch diese Prozesse erst in ihre aktive Form überführt (Bioaktivierung) (Casida und Lykken, 1969; Katagi und Mikami, 2000). Das ist zum Beispiel bei Benzimidazol der Fall, welches durch Bioaktivierung in die wirksame Form Carbendazim umgewandelt wird (Vonk und Kaars Sijpesteijn, 1971). Phase II, die Konjugationsreaktion, verbindet die in Phase I gebildeten Produkte mit pflanzeneigenen, stark wasserlöslichen Bestandteilen wie Zucker, Aminosäuren und Glutathion (Baloch, 2000). Durch diese Konjugation wird die Wasserlöslichkeit der potenziell toxischen Stoffe erhöht und ihre Reaktivität und Toxizität verringert (Cole und Edwards, 2000). Die Hauptprodukte, die in die Konjugation von Pflanzenschutzmitteln involviert sind, sind Glukose, Glutathion, Malonsäure und Aminosäuren (Cole und Edwards, 2000). In Phase III werden die in Phase II gebildeten Produkte in sekundäre Konjugate oder unlösliche, gebundene Rückstände ("bound residues") umgewandelt (Dixon et al., 1997). Laut Van Eerd et al. (2003) ist die durch Pflanzen und Mikroorganismen verursachte enzymatische Transformation der Hauptmechanismus für den Abbau von Fungiziden.

Für Epoxiconazol ist bekannt, dass der Metabolismus des Wirkstoffs in der Pflanze nach der Applikation auf das Blatt begrenzt ist (EFSA, 2008). In Weizen verläuft der Abbau von Epoxiconazol durch Hydroxylierung der Chlorophenyl- und Oxiran-Ringe, Teilung des Oxiran-Rings und weitere Konjugationsprozesse (EFSA, 2008). Für die Bildung von Metaboliten in Pflanzen gibt es keine Hinweise (EFSA, 2008).

Die Biotransformation von Chlorthalonil in der Pflanze ist sehr extensiv. Der Stoffwechselvorgang schließt die Substitution der Chlorinegruppe mit einer Hydroxylgruppe ein. Diese kann zur Bildung des Metaboliten SDS-3701 führen (EFSA, 2012b). Der Anteil des Metaboliten in der Pflanze liegt jedoch bei unter 10%, der restliche Anteil ist unverändertes Chlorthalonil (FAO, 2010).

Für Fluxapyroxad bestehen die Hauptmechanismen der Biotransformation in Pflanzen vermutlich aus der N-Demethylierung der Pyrazol-Gruppe und der Hydroxylierung der Biphenyl-Gruppe mit weiterer Glycosylierung der Moleküle. In der Pflanze bildet Fluxapyroxad verschiedene Metaboliten, wie zum Beispiel M700F002 und M700F048 (EFSA, 2012a).

Für den biotischen Abbau von Pflanzenschutzmitteln außerhalb der Pflanze ist die Verstoffwechselung durch Mikroorganismen die treibende Kraft. Der Abbau im Boden und im Wasser ist oft stärker durch Mikroorganismen getrieben als durch physikalische oder chemische Prozesse (Munnecke et al., 1982).

1.5 Epidemiologie der untersuchten Weizenpathogene

1.5.1 Zymoseptoria tritici

Zymoseptoria tritici (Desm.) Quaedvlieg & Crous (früher *Septoria tritici*) (Quaedvlieg et al., 2011), die anamorphe Form des Ascomyceten *Mycosphaerella graminicola* (Fuckel) J. Schröt in Cohn, gehört zu den Deuteromyceten (Cunfer, 1997). Septoria-Krankheiten kommen weltweit vor (Agrios, 2005; Eyal et al., 1987). In Westeuropa ist *Z. tritici* die Leitkrankheit an Winterweizen (Halama, 1996; Hardwick et al., 2001) und zählt zu den wirtschaftlich bedeutendsten Krankheitserregern (Eyal, 1999; Hardwick et al., 2001). Die Krankheit tritt vor allem in feuchten und kühlen Klimaregionen auf. Dort werden durch *Z. tritici* häufig hohe Ertrags- und Qualitätsverluste verursacht (Halama, 1996; Hardwick et al., 2001). Die Ertragsverluste können zwischen 30 und 50% liegen (Eyal et al., 1987; Arraiano et al., 2001; Simon et al., 2002). In Jahren mit feuchter Witterung wurden in Norddeutschland Ertragsverluste von bis zu 20 dt/ha berichtet (Ceynowa et al., 1993). Besonders bei einem starken Befall der oberen drei Blattetagen (F bis F-2) sind die Verluste sehr hoch (King et al., 1983a,b; Thomas et al., 1989; Cook, 1999).

Bereits im Herbst können Infektionen mit *Z. tritici* in jungen Weizenbeständen auftreten (Shaw und Royle, 1989; Ceynowa et al., 1993). Diese werden durch Pyknosporen aus Pyknidien verursacht, die sich auf Ernteresten oder Ausfallgetreide gebildet haben (Ceynowa et al., 1993). Möglich sind auch Herbstinfektionen durch luftbürtige Askosporen des sexuellen Stadiums *M. graminicola* (Verreet et al., 1990; Shaw und Royle, 1989; Eyal, 1999). Dieser Infektionsweg ist in Deutschland jedoch sehr unwahrscheinlich (Ceynowa et al., 1993). *Z. tritici* überwintert als Myzel und als Pyknospore in Pyknidien auf und in infizierten Samen und auf kranken Pflanzenrückständen im Feld (Agrios, 2005). Eine (epidemische) Ausbreitung während der Saison findet durch das asexuelle Stadium *Z. tritici* statt (Shaw und Royle, 1989). Zum Ende der Saison können sich dann neben Pyknidien (asexuell) auch Pseudothecien (sexuell) bilden, welche Askosporen enthalten (Halama, 1996; Eriksen et al., 2001). Diese wurden in Deutschland bisher jedoch nur ein einziges Mal nachgewiesen (Verreet et al., 1990).

Typische Symptome für Z. *tritici* sind hellgrüne bis gelbe oder braune, ovale Läsionen, die sich schnell zu unregelmäßigen Flecken ausbreiten und dunkel verfärben. Die Blattflecken können voneinander abgegrenzt sein oder verschmelzen und die gesamte Blattfläche bedecken. Auf den Blattflecken bilden sich im Krankheitsverlauf viele kleine eingesunkene, dunkle Py-knidien, welche den Flecken ein gesprenkeltes Aussehen geben (Hoffmann und Schmutterer, 1999; Agrios, 2005).

Bei hoher Luftfeuchte (> 98%) oder Blattnässe schwellen die Pyknidien an und entlassen die reifen Pyknosporen in langen, leicht rosa bis weißen Ranken durch die Ostiole (Eyal, 1971; Agrios, 2005). Für eine weitere Verbreitung der Pyknosporen und eine Übertragung auf höhere Blattetagen sind Niederschläge gefolgt von anhaltender Blattnässe notwendig. Es kommt aber auch zur Verbreitung durch Bewässerungswasser, Arbeitsgeräte, Tiere usw. (Obst und Gehring, 2002; Agrios, 2005). Die gekeimten Pyknosporen dringen meistens direkt über die Stomata in das Pflanzengewebe ein (Duncan und Howard, 2000; Cohen und Eyal, 1993), in selteneren Fällen werden auch Appressorien gebildet (Cohen und Eyal, 1993; Kema et al., 1996).

Der Infektionsprozess von Z. *tritici* kann bei Temperaturen zwischen 2 und 36°C stattfinden (Weber, 1922; Hoffmann und Schmutterer, 1999). Die Optimaltemperatur wird in der Literatur mit 16 bis 25°C angegeben. Hess und Shaner (1987) und Ceynowa et al. (1993) gaben einen Temperaturbereich von 16-20°C als Temperaturoptimum für eine erfolgreiche Infektion an. Shaner und Finney (1976) grenzten die optimale Temperatur für den Keimungsprozess zwischen 20-25°C ein. Laut Weber (1922) liegt das Optimum bei 22-24°C. Temperaturen unter 7°C beeinflussen die Keimung und das Myzelwachstum negativ (Shaner und Finney, 1976).

Für die Infektion von Z. *tritici* und alle folgenden Stadien im Infektionszyklus ist Feuchte in Form von Regen und Tau notwendig (Gough, 1978; Bahat et al., 1980; Hess und Shaner, 1987). Es ist eine Blattnässedauer von mindestens 20 Stunden für eine erfolgreiche Infektion erforderlich (Holmes und Colhoun, 1974). In anderen Quellen wird sogar eine Dauer von 48 Stunden angegeben (Hess und Shaner, 1987; Ceynowa et al., 1993). Freies Wasser auf Blättern fördert Sporenkeimung, Wachstum der Keimschläuche und Penetrationsrate (King et al., 1983a; Magboul et al., 1992).

Optimale Bedingungen für den Infektionsprozess liegen bei einer Kombination aus 16-20°C und einer Blattnässedauer von mehr als 48 Stunden vor (Hess und Shaner, 1987; Ceynowa et al., 1993; Hoffmann und Schmutterer, 1999). Die besten Infektionserfolge bei künstlichen Inokulationen wurden nach Magboul et al. (1992) und Klink (1997) bei 18°C und 96 Stunden Blattnässe erreicht.

Die Latenzzeit von Z. *tritici* liegt zwischen 14 und 21 Tagen (Eyal et al., 1987). Bei Temperaturen unter 15 und über 22°C kann die Latenzzeit bis zu 40 Tage betragen (Erven, 2011). Der Unterschied in der Latenzzeit zwischen gering und stark anfälligen Sorten beträgt im Durchschnitt 3 Tage (Erven, 2011). Nach Ablauf der Latenzzeit werden dann neue Symptome sichtbar.

1.5.2 Puccinia triticina

Puccinia triticina (Erikss.) (früher *P. recondita* f. sp. *tritici*) gehört zu den Basidiomyceten (Obst und Gehring, 2002; Bolton et al., 2008). An Winterweizen kommt*P. triticina* weltweit vor (Roelfs et al., 1992; Hoffmann und Schmutterer, 1999; Agrios, 2005; Bolton et al., 2008). Roste im Allgemeinen gehören zu den Pathogenen mit dem höchsten Schadpotenzial (Agrios, 2005).

Die Ertragsverluste durch *P. triticina* können 25% betragen, wenn das Fahnenblatt infiziert wird (Stuckey und Zadocks, 1989). Huerta-Espino et al. (2011) berichten sogar von bis zu 50% Ertragsverlust. Besonders starke Rostinfektionen vor oder während der Blüte sind extrem schädigend (Roelfs et al., 1992; Agrios, 2005), da außer dem Ertrag auch die Erntequalität beeinträchtigt wird (Obst und Gehring, 2002; Agrios, 2005). Durch Befall mit *P. triticina* wird die Photosyntheseleistung vermindert und es kommt zu einem erhöhten Wasserverlust der Pflanze (Hartleb et al., 1995; Agrios, 2005), der durch die reduzierte grüne Blattfläche und die verletze Epidermis hervorgerufen wird (Agrios, 2005). Außerdem führen Infektionen zu einer früheren Seneszenz der Pflanze und damit zu einer kürzeren und gestörten Kornfüllungsphase. In der Folge kommt es zu Qualitäts- und Ertragsverlusten (Hartleb et al., 1995; Agrios, 2005; Bolton et al., 2008). Einbußen in der Qualität sind vor allem eine schlechtere Mahlqualität und geringere schlechte Nährwerte, die durch eine verringerte Stärkeeinlagerung hervorgerufen werden (Agrios, 2005).

P. triticina ist ein obligater Parasit mit biotropher Lebensweise. Das bedeutet, dass er das ganze Jahr über lebende Wirtspflanzen benötigt (Obst und Gehring, 2002; Agrios, 2005; Bolton et al., 2008). Insgesamt werden fünf eindeutige Fruchtstrukturen mit fünf verschiedenen Sporenformen gebildet (Bolton et al., 2008). Im Frühjahr werden auf dem Zwischenwirt Äziosporen gebildet (Agrios, 2005). In Europa ist *Thalictrum speciosissimum*, die Blaugrüne Wiesenraute, der häufigste Zwischenwirt (Roelfs et al., 1992). Die Äziosporen werden durch Wind auf nahe gelegene Weizenpflanzen getragen und infizieren die Blätter und Stängel durch die Stomata. Auf dem Weizen bilden sich Uredia mit Uredosporen (Agrios, 2005). Diese werden durch Wind, Tiere, Insekten und Regen verbreitet. Bis zur Abreife der Pflanzen erfolgen weitere Infektionen durch die Uredosporen (Agrios, 2005; Bolton et al., 2008).

Später produzieren die Uredia schwarz-braune Teleutosporen (Bolton et al., 2008), welche als sexuelles, überwinterndes Stadium dienen (Agrios, 2005). Im Frühling wird bei Keimung der Teleutosporen das Basidium gebildet (Bolton et al., 2008). Die daraus entstehenden Basidiosporen werden durch Wind an den Zwischenwirt getragen. Die Basidiosporen bilden Sepermagonia auf dem Zwischenwirt, welche Spermatien enthalten (Agrios, 2005). Das aus Spermagonia und Spermatien entstandene Myzel produziert Äzia, deren Äziosporen den Weizen infizieren (Bolton et al., 2008).

Typische Symptome von *P. triticina* sind zahlreiche elliptische, orangerote bis braune Pusteln (Uredia), welche verstreut auf der Blattober- oder Blattunterseite angeordnet sind (Agrios, 2005; Bolton et al., 2008). Die Pusteln haben einen Durchmesser von etwa 1,5 mm (Bolton et al., 2008).

Die Entwicklung von *P. triticin*a kann zwischen 2 und 32°C stattfinden (Mehta, 1923; Roelfs et al., 1992). Angaben für die Optimaltemperatur während der Uredosporenkeimung liegen zwischen 16°C (Eversmeyer et al., 1988) und 20°C (Roelfs et al., 1992; de Vallavieille-Pope et al., 1995). Bolton et al. (2008) und de Vallavieille-Pope et al. (1995) berichten bei 10-25°C von guten Keimungsbedingungen. Bei mehr als 20°C ist die Keimungsrate deutlich reduziert (Wiese und Ravenscroft, 1979). Für das Myzelwachstum liegt das Temperaturoptimum mit 25°C etwas höher (Roelfs et al., 1992). Die Sporenproduktion ist zwischen 10-25°C am höchsten, ab 30°C kommt sie zum Erliegen (Tomerlin et al., 1983).

Neben einer günstigen Temperatur ist ein Wasserfilm für die erfolgreiche Infektion von P. triticina notwendig (Wiese und Ravenscroft, 1979; Eversmeyer et al., 1988; de Vallavieille-Pope et al., 1995). Bei einer Benetzungsdauer von 3 Stunden und einer Temperatur von 20°C herrschen gute Infektionsbedingungen für P. triticina (Stubbs et al., 1986; Roelfs et al., 1992; Bolton et al., 2008). Eversmeyer et al. (1988) berichten ebenfalls von einer minimalen Benetzungsdauer von 3 Stunden, nach 5 Stunden wurde in ihren Untersuchungen die maximale Keimungsrate erreicht. In anderen Untersuchungen wurde die maximale Keimungsrate bei 20°C und 100% relativer Luftfeuchte nach 4 (de Vallavieille-Pope et al., 1995) bis 8 Stunden erreicht (Bolton et al., 2008). Studien von Räder (2007) zufolge sind bei Temperaturen zwischen 5 und 25°C nach 4 Stunden Benetzungsdauer mindestens 80% der Sporen gekeimt. Laut Stuckey und Zadocks (1989) ist eine Benetzungsdauer von mindestens 6 Stunden für eine erfolgreiche Infektion erforderlich. Die optimale Benetzungsdauer liegt zwischen 15 und 24 Stunden (Räder, 2007). Generell ist die Anzahl der Infektionen bei längerer Benetzungsdauer höher und bei niedrigeren Temperaturen eine längere Benetzungsdauer erforderlich. Bei 10°C zum Beispiel sind 12 Stunden Benetzung für eine erfolgreiche Infektion notwendig (Roelfs et al., 1992). De Vallavieille-Pope et al. (1995) ermittelte für Infektionen bei 25°C

eine minimale Benetzungsdauer von 2 Stunden, bei 20°C von 2-4 Stunden, bei 10°C von 6 Stunden und bei 5°C von 6-8 Stunden.

Die Zeit von einer künstlichen Inokulation mit Uredosporen bis zur Bildung neuer Uredoporen beträgt laut Agrios (2005) bei 5°C 22 Tage, bei 10°C 15 Tage und bei 23°C 5-6 Tage. In anderen Studien wird von Latenzzeiten zwischen 7-10 Tagen berichtet (Roelfs et al., 1992; Bolton et al., 2008). Die infektiöse Phase der Uredia, das bedeutet die Zeitspanne während der eine Sporulation stattfindet, beträgt bei Temperaturen zwischen 21 und 29°C durchschnittlich 19-37 Tage (Tomerlin et al., 1983). Grundsätzlich ist die Latenzzeit bei höheren Temperaturen kürzer, die infektiöse Phase der Uredia jedoch auch (Tomerlin et al., 1983). Das bedeutet, dass bei höheren Temperaturen die einzelnen Generationen von *P. triticina* kürzer leben, aber schneller infizieren.

2 Material und Methoden

I^N diesem Kapitel wird die Versuchsdurchführung der Freiland- und Laborversuche beschrieben. Außerdem wird die statistische Auswertung sowie das Vorgehen bei der Entwicklung des Modells zur Prognose der Wirkungsdauer erläutert.

2.1 Freilandversuche

2.1.1 Boniturschema

Die Bonitur der Freilandversulemuche erfolgte in allen Versuchsjahren nach dem gleichen Schema durch visuelle Schätzung der prozentual befallenen Blattfläche (= Befallsstärke). Außerdem wurde die Befallshäufigkeit erfasst. Das Hauptaugenmerk der Bonituren lag auf *Z. tritici* und *P. triticina*, es wurden aber auch alle anderen auftretenden Blattkrankheiten bonitiert. Die Bonitur von *Z. tritici* erfolgte erst, wenn eindeutig Pyknidien auf der Läsion zu erkennen waren. Ohne Pyknidien als sicheres Zeichen für *Z. tritici* war die Verwechslungsgefahr mit Läsionen anderer Pathogene oder abiotischer Ursachen zu hoch. Die Schätzung der Befallsstärke bezog sich ebenfalls nur auf die Fläche einer Läsion, auf der Pyknidien zu erkennen waren. Bei der Bonitur von *P. triticina* wurde die Fläche der Rostpusteln mit chlorotischen Vorhöfen geschätzt.

Als abgestorben wurden Blätter bezeichnet, bei denen der Anteil an nekrotisiertem Blattgewebe 80% überstieg. Wenn 60% der Blätter einer Blattetage abgestorben waren, wurde die Bonitur dieser Etage beendet. Bei Erreichen von BBCH-Stadium 75 (Mitte Milchreife) (Meier, 2001) wurde die gesamte Bonitur des Versuchs beendet.

In Rheinland-Pfalz wurden in Parzellenversuchen Einzelblattbonituren an markierten Pflanzen durchgeführt. Für die Einzelblattbonituren wurden vor Versuchsbeginn pro Versuchsglied 100 Haupthalme markiert. Die Etiketten wurden zickzackförmig in der Parzelle verteilt, wobei 50 cm an den Parzellenenden und 20 cm an den Seitenrändern freigelassen wurden. Die erste

2 Material und Methoden

Bonitur wurde direkt vor der Fungizidapplikation durchgeführt, die weiteren Bonituren erfolgten in wöchentlichem Abstand. Pro markiertem Haupthalm wurden jeweils die Blattoberseiten der oberen vier vollentwickelten Blattetagen bonitiert.

In weiteren Bundesländern wurden in Validierungsversuchen Parzellenbonituren durch die Pflanzenschutzdienste der Länder (PSD) durchgeführt. Bei den Parzellenbonituren wurde die Befallsstärke an vier bis zehn Stellen pro Parzelle geschätzt. Hierfür wurde der Bestand an den entsprechenden Stellen mit Hilfe eines ein Meter langen Stabes aufgeklappt und entlang diesem der Befall geschätzt. Wie bei den Einzelblattbonituren, wurde der Befall für jede der vier oberen vollentwickelten Blattetagen separat bonitiert.

2.1.2 Parzellenversuche zur Wirkungsdauer

In den Jahren 2012, 2013 und 2014 wurden insgesamt neun Parzellenversuche in Rheinland-Pfalz angelegt (Tab. 2). Ziel der Versuche war es, die Wirkungsdauer von Fungiziden unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu untersuchen. Der Versuchsaufbau war in jedem Jahr gleich, jedoch unterschieden sich die Applikationstermine der Fungizide von Jahr zu Jahr. Für alle Versuche wurde die Sorte JB Asano (Saatzucht Breun) verwendet. Diese Sorte wurde nach "Beschreibender Sortenliste" des Bundessortenamtes gegenüber *Z. tritici* als stark anfällig (BSA-Note 6), gegenüber *P. triticina* und *P. striiformis* als mittel anfällig (BSA-Note 5) und gegenüber *B. graminis* als gering anfällig (BSA-Note 3) eingestuft (Bundessortenamt, 2013).

Die Versuche wurden mit Parzellensägeräten ausgesät. Die Parzellengröße betrug je nach Standort 10-12 m². Insgesamt wurden fünf Versuchsglieder mit je vier Wiederholungen in einer randomisierten Blockanlage angelegt (Tab. 3). Versuchsbegleitende ackerbauliche Kulturmaßnahmen wie der Einsatz von Wachstumsreglern, Herbiziden und Insektiziden sowie die Düngung wurden standortsepzifisch und praxisüblich durchgeführt.

2012		2013		2014	1
Biedesheim	Bied12	Biedesheim	Bied13	Biedesheim	Bied14
Herxheim	Herx12	Herxheim	Herx13	Herxheim	Herx14
Nieder-Hilbersheim	NiHi12	Münstermaifeld	Rose13	Wahlbach	Waba14

Tabelle 2: Standorte der Parzellenversuche in Rheinland-Pfalz in den Jahren 2012 bis 2014 mit dazugehörigen Standortkürzeln.

Tabelle 3: Versuchsgliede	er (VG) der Parzellenver	rsuche mit den entspr	echenden Fungizidauf	wand- und
Wassermenger	n.			

VG	Behandlung	Aufwandmenge	Wassermenge
1	unbehandelt		
2	Bravo 500® (500 g/l Chlorthalonil)	2 1/ha	300 l/ha
3	Epoxion® (125 g/l Epoxiconazol)	1 l/ha	300 l/ha
4	Imbrex® (62,5 g/l Fluxapyroxad)	2 l/ha	300 l/ha
5	Epoxion + Imbrex®	0,5 l/ha + 1 l/ha	300 l/ha

2.1.2.1 Parzellenversuche 2012

Im Jahr 2012 wurden Parzellenversuche an den Standorten Biedesheim, Herxheim und Nieder-Hilbersheim angelegt (Tab. 4). Die Applikation erfolgte nach Überschreiten der "vereinfachten Beer-Schwelle" (Jörg und Krauthausen, 1994). Diese Bekämpfungsschwelle für *Z. tritici* empfiehlt eine Applikation bei 33% Befallshäufigkeit auf der jeweils drittoberen Blattetage. Der späteste Applikationstermin wurde auf BBCH 51 (Beginn des Ährenschiebens) festgelegt für den Fall, dass die Bekämpfungsschwelle bis zu diesem Termin noch nicht überschritten wurde. Die Fungizidapplikation erfolgte entweder mit einem Parzellenspritzgerät oder mit einer Rückenspritze (siehe Anhang 1.5) mit Spritzgestänge. Das Spritzgestänge hatte eine Länge von 2,5 m, an dem im Abstand von 0,5 m Düsen (siehe Anhang 1.5) angebracht waren. Der Abstand vom Spritzgestänge zu den Pflanzen betrug 0,5 m. Die Applikation wurde mit 3,8 bar durchgeführt, sodass umgerechnet etwa 300 l Spritzbrühe pro Hektar ausgebracht wurden. Die Bonituren wurden wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben durchgeführt.

2.1.2.2 Parzellenversuche 2013

Im Jahr 2013 wurden an den Standorten Biedesheim, Herxheim und Münstermaifeld Parzellenversuche angelegt (Tab. 5). Der Applikationstermin wurde auf BBCH 39 (Ligula-Stadium) festgelegt, da zu diesem Stadium alle Blätter vollentwickelt waren und somit bei der Applikation mit Fungizid behandelt wurden. Die Applikation wurde mit einem Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge durchgeführt (siehe Kapitel 2.1.2.1 und Anhang 1.5). Bei den Bonituren wurde wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben vorgegangen.

Zur Analyse der Wirkstoffgehalte in den Blättern wurden am Standort Münstermaifeld ab Applikation der Fungizide Blattproben genommen. An jedem Boniturtermin wurden pro Parzelle jeweils vier Blätter der Blattetage F-1 beprobt (= 16 Blätter pro Versuchsglied).

	Biedesheim	Herxheim b. Landau	Nieder- Hilbersheim
Region	Westpfalz	Südpfalz	Rheinhessen
Höhe [m ü. NN]	262 m	129 m	244 m
Zehnjährige Durchschnitts- temperatur (2 m)	9,8 °C	10,9 °C	10,7 °C
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	185,0 mm	182,3 mm	160,2 mm
Wetterstation	Weyerhof	Herxheimweyher	Gau-Algesheim
Entfernung von der Wetterstation	7,0 km	2,6 km	6,5 km
Sorte	JB Asano	JB Asano	JB Asano
Aussaatdatum	23.09.2011	24.10.2011	18.10.2011
Aussaatmenge	300 g/m ²	280 g/m ²	300 g/m ²
Auflaufdatum	01.10.2011	16.11.2011	20.11.2011
Vorfrucht	Sommergerste	Zuckerrübe	Sommerweizen
Bodenart	sandiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm
Parzellengröße	10,5 m ²	10,0 m ²	10,0 m ²
Applikationsdatum	01.06.2012	23.05.2012	05.06.2012
Applikationsmethode	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge	Parzellenspritzgerät	Parzellenspritzgerät
BBCH zum Zeitpunkt der Applikation	57	55	59
Anzahl Bonituren ab Applikation	6	6	3

Tabelle 4: Schlagdaten der Parzellenversuchsstandorte in Rheinland-Pfalz im Jahr 2012.

	Biedesheim	Herxheim b. Landau	Münstermaifeld
Region	Westpfalz	Südpfalz	Eifel
Höhe [m ü. NN]	262 m	129 m	271 m
Zehnjährige Durchschnitts- temperatur (2 m)	9,8 °C	10,9 °C	9,8 °C
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	184,2 mm	168,1 mm	171,6 mm
Wetterstation	Weyerhof	Herxheimweyher	Münstermaifeld
Entfernung von der Wetterstation	7,0 km	2,6 km	1,3 km
Sorte	JB Asano	JB Asano	JB Asano
Aussaatdatum	01.10.2012	18.10.2012	22.10.2012
Aussaatmenge	330 g/m ²	350 g/m ²	320 g/m ²
Auflaufdatum	18.10.2012	10.11.2012	10.11.2012
Vorfrucht	Sommergerste	Zuckerrübe	Winterweizen
Bodenart	sandiger Lehm	sandiger Lehm	lehmiger Sand
Parzellengröße	10,5 m ²	10,0 m ²	10,5 m ²
Applikationsdatum	24.05.2013	24.05.2013	27.05.2013
Appliaktionsmethode	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge
BBCH zum Zeitpunkt der Applikation	39	39	39
Anzahl Bonituren ab Applikation	9	8	8

Tabelle 5: Schlagdaten der Parzellenversuchsstandorte in Rheinland-Pfalz im Jahr 2013.

2 Material und Methoden

Die Analysen der Blattproben wurden von der Firma Eurofins Dr. Specht Laboratorien GmbH, Hamburg durchgeführt. Die Proben wurden mit der QuEChERS-Methode nach EN 15662:2008 analysiert (Anastassiades, 2010). QuEChERS beschreibt ein Verfahren zur gleichzeitigen Bestimmung von Rückständen zahlreicher Pestizide in Lebensmitteln (Paya et al., 2007). Für die Analyse von Chlorthalonil wurde das Verfahren mit Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MSD) kombiniert. Für die Analyse von Epoxiconazol und Fluxapyroxad wurde die QuEChERS-Methode mit Flüssigchromatographie mit Tandem-Massenspektrometrie-Kopplung (LC/MS/MS) kombiniert.

Für die Berechnung der Halbwertszeit der Fungizide wurde das Zerfallsgesetz nach Rutherford und Soddy (1903) herangezogen:

$$N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t} \tag{2.1}$$

wobei $N_{(t)}$ die Wirkstoffmenge zum Zeitpunkt *t* beschreibt, N_0 die Wirkstoffmenge direkt nach Applikation ist, *t* die Zeit darstellt und λ der Zerfallsfaktor ist.

Um die Halbwertszeit berechnen zu können, muss Gleichung 2.1 die Bedingung $N_{(HWZ)} = \frac{1}{2}N_0$ erfüllen, wobei HWZ die Halbwertszeit ist. Die Halbwertszeit kann durch Einsetzen der Bedingung mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$HWZ = \frac{-\log\left(\frac{1}{2}\right)}{\lambda}$$
(2.2)

wobei HWZ die Halbwertszeit und λ der Zerfallsfaktor ist.

Die Messwerte der Rückstandsanalysen wurden mit einer Exponentialfunktion angepasst:

$$FR = ae^{-bt} \tag{2.3}$$

wobei FR die Menge des Wirkstoffgehaltes in den Blätter angibt, *t* die Zeit in Tagen nach der Applikation ist und *a* und *b* Formparameter sind.

2.1.2.3 Parzellenversuche 2014

Im Jahr 2014 wurden Parzellenversuche an den Standorten Biedesheim, Herxheim und Wahlbach angelegt (Tab. 6). Die Versuche wurden nach dem Prognosemodell SEPTRI (*Zy-moseptoria-tritici*-Modell) behandelt. Dieses Modell berechnet das Auftreten von Neuinfektionen und die Dauer der Latenzzeit von *Z. tritici* (Erven, 2011). Die Applikation wurde durchgeführt, wenn die Latenzzeit auf F-2 zu 30% abgelaufen war, spätestens jedoch zu

2 Material und Methoden

BBCH 39 (Ligula-Stadium). Auf Grund der Ergebnisse der Parzellenversuche 2012 und 2013, wurde die Boniturmethode angepasst. Im Jahr 2014 wurde anstatt der Befallsstärke nur noch die Befallshäufigkeit ermittelt. Die Einzelblattbonituren wurden jedoch wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben beibehalten.

2.1.2.4 Blattsegmenttest zur Bestimmung der Fungizidwirkungsdauer gegen *Puccinia triticina*

Im Jahr 2014 wurde ergänzend zu den Parzellenversuchen ein Blattsegmenttest mit *P. triticina* durchgeführt. Ziel war es, die Dauer der Fungizidwirkung von Epoxion und Imbrex sowie der Mischung aus Epoxion + Imbrex im Freiland gegen *P. triticina* zu untersuchen.

Das P. triticina-Inokulum für diesen Versuch wurde auf Winterweizenpflanzen der Sorte JB Asano vermehrt. Im Gewächshaus wurden Pflanzen in Göttinger-Töpfen (9 x 9 x 9,5 cm) mit "Frühstorfer Erde Typ I" unter Natriumdampflampen (16/8 Stunden Tag/Nacht-Rythmus) und bei regelmäßiger Bewässerung angezogen (siehe Anhang 1.4). In jeden Topf wurden 12 Körner ausgesät. Die gesunden Pflanzen wurden in BBCH-Stadium 13-23 (2-Blatt-Stadium/ 3 Bestockungstriebe sichtbar) mit P. triticina inokuliert. Dazu wurden gesunde Pflanzen mit Leitungswasser befeuchtet und mit Uredosporen, von mit P. triticina befallenen Blättern aus dem Freiland (Herkunft Mainz-Gonsenheim), bestäubt. Die frisch inokulierten Pflanzen wurden in durchsichtigen Kunststoffbeuteln aus Polyethylen luftdicht verpackt, um eine Luftfeuchte nahe 100% zu erhalten. Die Inkubation erfolgte bei 15°C im Klimaschrank. Nach 72 Stunden wurden die Kunststoffbeutel entfernt und die Pflanzen bei 1SC und einem Tag/Nacht-Rhythmus von 12/8 Stunden unter Leuchtstoffröhren (Osram) weiterkultiviert (siehe Anhang 1.4). Der Abstand von den Lampen zu den Pflanzen betrug 10-25 cm, je nach Größe der Pflanzen. Etwa 22 Tage nach der Inokulation konnten die neu gebildeten Uredosporen geerntet werden. Dazu wurden die infizierten Blätter vorsichtig über einem Papierblatt abgeklopft. Das so gesammelte Inokulum wurde mit einer Spatelspitze Talkum vermischt und in Eppendorftubes bei 4°C im Kühlschrank gelagert.

Die Blattproben für den Blattsegmenttest wurden ab Applikation wöchentlich an allen drei Parzellenversuchsstandorten genommen. Pro Versuchsglied wurden 20 Blätter der Blattetage F-1 entnommen (= 5 Blätter pro Wdh.). Die Blätter wurden während des Transportes ins Labor in einer Isolierbox mit Kühlakkus möglichst kühl gelagert.

Vor Versuchsbeginn wurde 1%-iger Wasseragar mit 100 mg/l Benzimidazol (Arraiano et al., 2001) (siehe Anhang 1.2) hergestellt und jeweils 75 ml pro Petrischale (d = 15 cm) ausgegossen. Direkt vor der Inokulation mit *P. triticina* wurde der Wasseragar nach veränderter

	Biedesheim	Herxheim b. Landau	Wahlbach
Region	Westpfalz	Südpfalz	Hunsrück
Höhe [m ü. NN]	262 m	129 m	440 m
Zehnjährige Durchschnitts- temperatur (2 m)	9,7 °C	10,8 °C	8,8 °C
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	184,9 mm	174,8 mm	191,1 mm
Wetterstation	Weyerhof	Herxheimweyher	Wahlbach
Entfernung von der Wetterstation	7,0 km	2,6 km	0,8 km
Sorte	JB Asano	JB Asano	JB Asano
Aussaatdatum	01.10.2013	17.11.2013	04.10.2013
Aussaatmenge	300 g/m ²	330 g/m ²	310 g/m ²
Auflaufdatum	21.10.2013	11.12.2013	22.10.2013
Vorfrucht	Sommergerste	Zuckerrübe	Winterweizen
Bodenart	sandiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm
Parzellengröße	10,5 m ²	10,0 m ²	12,5 m ²
Applikationsdatum	05.05.2014	13.05.2014	14.05.2014
Appliaktionsmethode	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge	Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge
BBCH zum Zeitpunkt der Applikation	37	39	39
Anzahl Bonituren ab Applikation	8	2	8

Tabelle 6: Schlagdaten der Parzellenversuchsstandorte in Rheinland-Pfalz im Jahr 2014.
Methode von Arraiano et al. (2001) vorbereitet. Aus der Mitte des Agars wurde ein 9 x 4 cm großes Rechteck ausgeschnitten und dieses längs halbiert. Die beiden so entstandenen Agarstreifen wurden an den Rand der Petrischale gelegt. Die Blätter aus den Parzellenversuchen wurden auf 7 cm Länge gekürzt, wobei der mittlere Blattteil verwendet wurde. Die Blattsegmente wurden dann auf einem Tisch ausgelegt und mit einer Sprühflasche leicht mit sterilem Leitungswasser befeuchtet. Anschließend wurde mit einem Handzerstäuber (siehe Anhang 1.5) das Uredosporen-Talkum-Gemisch auf die Blätter gestäubt (Füllmenge ca. 3 g). Jeweils vier inokulierte Blattsegmente wurden über das Rechteck im Agar gelegt und mit den beiden Agarstreifen an den Enden fixiert (Abb. 5). Die Petrischalen wurden mit Parafilm verschlossen und bei 15°C und 16/8 Tag/Nacht-Rhythmus unter Leuchtstoffröhren (Sylvania) inkubiert (siehe Anhang 1.4). Die Bonitur wurde 14 Tage nach der Inokulation durchgeführt, wobei für jedes Blatt das Auftreten von *P. triticina* dokumentiert wurde, indem die Anzahl der Pusteln pro Blatt gezählt wurden.



Abbildung 5: Mit *Puccinia triticina* inokulierte Winterweizenblätter (JB Asano) auf 1%igem Wasseragar (100 mg/l Benzimidazol) sechs Tage nach Inokulation.

2.1.3 Validierungsversuche

In den Versuchsjahren 2012 bis 2014 wurden, neben den in Rheinland-Pfalz durchgeführten Parzellenversuchen, insgesamt 20 Validierungsversuche in weiteren Bundesländern angelegt. Die Versuche wurden nach den gleichen Vorgaben durchgeführt, wie die Parzellenversuche im selben Jahr. Neben der Sorte JB Asano wurden allerdings auch andere Sorten verwendet. Die Bonituren wurden, wie in Kapitel 2.1.1, erläutert durchgeführt. Die genauen Standorte und Schlagdaten sind den Tabellen 7, 8 und 9 zu entnehmen. Ausgesät wurden die Versuche mit Parzellensägeräten. Die Parzellengröße betrug je nach Standort 9,5 bis 20 m². Versuchsbeglei-

tende ackerbauliche Kulturmaßnahmen, wie der Einsatz von Wachstumsreglern, Herbiziden und Insektiziden sowie die Düngung wurden, wie auch bei den Parzellenversuchen, standortsepzifisch und praxisüblich durchgeführt.

2.1.4 Halbfreilandversuche zur Fungizidwirkungsdauer in Abhängigkeit vom Niederschlag

Um den Einfluss von Niederschlag auf die Fungizidwirkungsdauer zu untersuchen, wurde in den Jahren 2013 und 2014 auf dem Gelände der DEULA in Bad Kreuznach ein Halbfreilandversuch angelegt, bei dem die eine Hälfte überdacht wurde. Der Versuch wurde mit den Fungiziden Epoxion (125 g/l Epoxiconazol) und Imbrex (62,5 g/l Fluxapyroxad) mit den vollen Feldaufwandmengen (1,0 beziehungsweise 2,0 l/ha) behandelt und mit *Z. tritici* und *P. triticina* künstlich inokuliert.

Nach Inokulation beider Pathogene wurde für 48 Stunden eine Sprühnebelanlage mit einem Schaltintervall von 30 Minuten eingeschaltet (Abb. 6), um die für eine erfolgreiche Infektion erforderliche Blattnässe zu erzeugen. Für diesen Zweck wurden CoolNet Pro 4-way Fogger der Firma Netafim verwendet (siehe Anhang 1.5). Sie erzeugen einen feinen Sprühnebel mit einer Tröpfchengröße von 65 µm.

Tab	oelle 7: Standorte	e und Schlagdat	en der Validieru	ngsversuche im	Jahr 2012.	
	BB	BW	NI	MM	MV	\mathbf{ST}
Standort	Nuhnen	Schwieber- dingen	Döteberg	Niederkassel	Biestow	Bernburg
Region	Frankfurt (Oder)	Stuttgart	Hannover	Bonn	Rostock	Magdeburg
Höhe [m ü. NN]	28 m	274 m	72 m	55 m	39 m	85 m
Zehnjährige	9,6°C	10,4°C	10,0°C	9,9°C	9,2°C	9,8°C
Durchschnitts-						
temperatur (2 m)						
Zehnjähriges	539 mm	814 mm	663 mm	809 mm	664 mm	558 mm
Niederschlagsmittel						
Sorte	JB Asano	Akteur	JB Asano	Orvantis	Brilliant	Akteur
Aussaatdatum	26.09.2011	24.10.2011	01.11.2011	12.11.2011	20.09.2011	15.09.2011
Auflaufdatum	04.10.2011	15.11.2011	21.11.2011	16.12.2011	27.09.2011	21.09.2011
Vorfrucht	Buchweizen	Wintergerste	Zuckerrübe	Zuckerrübe	Winterraps	Hafer
Bodenart	lehmiger Sand	sandiger Lahm	toniger Lehm	sandiger I ahm	sandiger Lahm	schluffiger Lahm
Parzellengröße	13.5 m^2	$12m^2$	$20 \mathrm{m}^2$	$25 \mathrm{m}^2$	12 m^2	12 m^2
Applikationsdatum	23.05.2012	28.05.2012	10.05.2012	05.06.2012	11.05.2012	11.05.2012
Appliaktions-	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG
methode						
BBCH zur	51	45	32	59	37	38
Applikation						
Anzahl Bonituren ab	5	4	8	2	2	ю
Applikation						
		PSG: Pai	rzellenspritzgerät			

	Iauell		sualell del vallule		1 Jaill 2015.		
	BB	BW	ВҮ	NW	MV	SN	\mathbf{ST}
Standort	Nuhnen	Stetten am Heuchelberg	Fraunberg	Niederkassel	Biestow	Grumbach	Bernburg
Region	Frankfurt (Oder)	Heilbronn	Erding	Bonn	Rostock	Dresden	Magdeburg
Höhe [m ü. NN]	28 m	197 m	444 m	55 m	39 m	281 m	85 m
Zehnjährige	9,7°C	9,9°C	8,4°C	9,9°C	9,3°C	9,8°C	9,8°C
Durchschnitts-							
temperatur (2 m)							
Zehnjähriges	543 mm	877 mm	830 mm	809 mm	865 mm	633 mm	558 mm
Niederschlagsmittel							
Sorte	Brilliant	Akteuer	JB Asano	JB Asano	Brilliant	Türkis	Akteur
Aussaatdatum	24.09.2012	14.10.2012	18.10.2012	21.10.2012	21.09.2012	05.10.2012	21.09.2012
Auflaufdatum	04.10.2012	05.11.2012	13.11.2012	05.02.2013	02.10.2012	20.10.2012	02.10.2012
Vorfrucht	Winterraps	Wintergerste	Winterraps	Winterraps	Winterraps	Sommergerste	Hafer
Bodenart	lehmiger Sand	sandiger Lehm	schluffiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm	Lehm
Parzellengröße	18 m^2	12 m^2	$9.5 \mathrm{m}^2$	$25 \mathrm{m}^2$	$15 \mathrm{m^2}$	20 m^2	12 m^2
Applikationsdatum	16.05.2013	28.05.2013	28.05.2013	25.05.2013	23.05.2013	06.06.2013	15.05.2013
Appliaktions-	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG
methode							
BBCH zur	39	39	39	39	37	41	37
Applikation							
Anzahl Bonituren	5	3	9	4	4	4	4
ab Applikation							
		PSG	: Parzellenspritzgerä	t			

Tabelle 8: Standorte und Schlagdaten der Validierungsversuche im Jahr 2013

2 Material und Methoden

T	abelle 9: Standorte	und Schlagdate	n der Validierun	gsversuche im Ja	hr 2014.	
	BB	BW	ВҮ	NI	NW	ST
Standort	Nuhnen	Stutensee	Fraunberg	Osnabrück	St. Augustin	Bernburg
Region	Frankfurt (Oder)	Karlsruhe	Erding	Osnabrück	Bonn	Magdeburg
Höhe [m ü. NN]	28 m	111 m	444 m	63 m	65 m	85 m
Zehnjährige	9,6°C	11,1°C	8,4°C	9,9°C	9,9°C	9,8°C
Durchschnitts-						
temperatur (2 m)						
Zehnjähriges	541 mm	853 mm	832 mm	783 mm	573 mm	558 mm
Niederschlagsmittel						
Sorte	Brilliant	Arezzo	JB Asano	JB Asano	JB Asano	JB Asano
Aussaatdatum	27.09.2013	29.11.2013	14.10.2013	15.10.2013	21.10.2013	23.09.2013
Auflaufdatum	11.10.2013	24.12.2013	11.11.2013	13.11.2013	19.11.2013	04.10.2013
Vorfrucht	Buchweizen	Zuckerrübe	Winterraps	Winterraps	Winterweizen	Saathafer
Bodenart	lehmiger Sand	sandiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm	Lehm
Parzellengröße	13.5 m^2	12 m^2	$9.5 \mathrm{m}^2$	$30 \mathrm{m^2}$	$12.5 { m m}^2$	$11,6 {\rm m}^2$
Applikationsdatum	29.04.2014	05.05.2014	06.05.2014	16.04.2014	06.05.2014	30.04.2014
Appliaktions-	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG
methode						
BBCH zur	34	45	34	34	39	37
Applikation						
Anzahl Bonituren	4	4	9	8	С	ю
ab Applikation						

PSG: Parzellenspritzgerät



Abbildung 6: Sprühnebelanlage des Halbfreilandversuchs (oben) mit CoolNet Pro 4-way Foggern der Firma Netafim (unten).



Abbildung 7: Dachkonstruktion des Halbfreilandversuchs für die Hälfte der Pflanzen ohne Niederschlagseinfluss.

Während des gesamten Versuchszeitraums wurde die Wettervorhersage verfolgt (www.wetter.com). Wurde für den Standort Niederschlag vorhergesagt, wurde über der Hälfte des Versuchsfel-

des ein Dach ausgerollt (Abb. 7). Das Dach bestand aus einer dunkelgrünen Polyethylen-Gewebeplane (siehe Anhang 1.4) und wurde wieder eingerollt, sobald für den nächsten Tag keine Niederschlagsprognose mehr erfolgte. So konnten alle Varianten mit und ohne Niederschlagseinfluss untersucht werden. Temperatur und relative Luftfeuchte während des gesamten Versuchszeitraums wurden sowohl in den überdachten, als auch den nicht überdachten Varianten mit Datenloggern (siehe Anhang 1.5) aufgezeichnet. Der Niederschlag wurde in den überdachten und nicht überdachten Varianten mit Regenmessern nach Prof. Hellmann (siehe Anhang 1.5) gemessen.

2.1.4.1 Halbfreilandversuch 2013

Im Jahr 2013 erfolgte die Durchführung des Halbfreilandversuchs mit Winterweizenpflanzen der Sorte JB Asano von einem Praxisschlag in Nieder-Hilbersheim mit Aussaatdatum 18.10.2012 (Tab. 10). Die Pflanzen wurden am 16.04.2013 ausgegraben und befanden sich zu diesem Zeitpunkt im Mittel in BBCH-Stadium 25 (fünf Bestockungstriebe sichtbar). Die Pflanzen wurden direkt mit dem Ackerboden (sandiger Lehm) in 15 l-Container (30 x 28 cm) gepflanzt und auf dem Versuchsgelände in Bad Kreuznach weiterkultiviert. Um die Pflanzen vor Trockenstress zu schützen, wurden die Töpfe zu 2/3 ihrer Höhe in den Boden eingegraben.

Herkunft der Pflanzen				
Standort	Nieder-Hilbersheim			
Region	Rheinhessen			
Höhe [m ü. NN]	244 m			
Zehnjährige Durchschnittstemperatur (2 m)	10,8 °C			
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	525,5 mm			
Wetterstation	Gau-Algesheim			
Entfernung von der Wetterstation	6,5 km			
Sorte	JB Asano			
Aussaatdatum	18.10.2012			
Auflaufdatum	22.11.2012			
Vorfrucht	Winterraps			
Bodenart	sandiger Lehm			
Halbfreilandversu	ch			
Standort	Bad Kreuznach			
Region	Nahe			
Höhe [m ü. NN]	104 m			
Zehnjährige Durchschnittstemperatur (2 m)	10,6°C			
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	558,3 mm			
Wetterstation	Bad Kreuznach; DEULA			
Entfernung von der Wetterstation	0,2 km			
Pflanzung in Töpfe	16.04.2013			

Tabelle 10: Kulturdaten des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2013.

Insgesamt wurden 36 Versuchsglieder mit je vier Wiederholungen untersucht (Abb. 8). Die Fungizidapplikation erfolgte zu BBCH 32, 39 und 49 mit einer Rückenspritze mit Spritzgestänge (siehe Kapitel 2.1.2.1 und Anhang 1.5). Nach der Applikation wurde jeweils die Hälfte des Versuchs mit *Z. tritici* und die andere Hälfte mit *P. triticina* künstlich inokuliert.

Für die Herstellung der *Z. tritici*-Sporensuspension fanden im Freiland gesammelte Blätter von unbehandelten Pflanzen mit *Z. tritici*-Läsionen Verwendung. Die Blätter wurden unter fließendem Wasser gereinigt und für 36-48 Stunden in eine Feuchtekammer gelegt, um das Austreten der Schleimranken aus den Pyknidien anzuregen. Danach wurden die Blätter in einem Erlenmeyerkolben mit destilliertem Wasser auf einem Schüttler bewegt und so die Schleimranken von den Pyknidien gelöst. Nach 15 Minuten erfolgte das Abgießen der Sporensuspension (Erven, 2011). Außerdem wurden auf Gemüsesaftagar kultivierte Sporen von *Z. tritici* (Isolat Q A7, siehe Anhang 1.3) mit destilliertem Wasser von den Agarplatten abgespült. Die beiden Sporensuspension wurden gemischt und mit Hilfe einer Thomakammer auf ca. $3x10^5$ Sporen/ml eingestellt. Die Versuchspflanzen erhielten mit einer Sprühflasche (siehe Anhang 1.4) acht Sprühstöße (= ca. 15 ml) von der fertigen Sporensuspension.

Das *P. triticina*-Inokulum wurde, wie in Kapitel 2.1.2.4 erläutert, gewonnen. Unmittelbar vor der *P. triticina*-Inokulation erfolgte eine Befeuchtung der Versuchspflanzen mit Leitungswasser und das Aufbringen des Uredosporen-Talkum-Gemisch mit einem Handzerstäuber (siehe Anhang 1.5). Je nach Versuchsglied wurden insgesamt ein bis fünf Inokulationen während des Versuchszeitraumes durchgeführt (Tab. 11).

Mit dem Ausrollen des Daches bei vorhergesagtem Niederschlag (Tab. 12) und den Bonituren wurde ab der ersten Fungizidapplikation begonnen. Pro Topf wurden fünf markierte Haupthalme bonitiert. Die Bonitur der mit *Z. tritici* inokulierten Pflanzen erfolgte einmal wöchentlich, die der mit *P. triticina* inokulierten Pflanzen - auf Grund der schnelleren Entwicklung des Pathogens- zweimal wöchentlich. Bei der Bonitur wurde die prozentuale Befallsstärke auf den oberen drei Blattetagen (F bis F-2) für jedes Blatt separat visuell geschätzt (siehe Kapitel 2.1.1). Die Befallshäufigkeit wurde mit Hilfe der ermittelten Befallsstärke und der Anzahl der bonitierten Pflanzen pro Topf berechnet.

Tabelle 11: Inokulationstermine des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer mit Zymoseptoria triticiund Puccinia triticina im Jahr 2013 für die drei Fungizidapplikationen zu BBCH 32, 39und 49.

	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 49
Applikationstermin	09.05.2013	04.06.2013	10.06.2013
BBCH zu Applikation	31-32	39	49
Inokulationen			
10.05.2013	Х		
15.05.2013	Х		
23.05.2013	Х		
06.06.2013	Х	Х	
12.06.2013	Х	Х	Х

Tabelle 12: Dauer der Überdachung des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2013.

Dach aus	sgerollt	Dach eir	ngerollt	
Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit	Dauer [h]
10.05.2013	17:00	13.05.2013	11:00	66
26.05.2013	15:00	31.05.2013	15:00	120
08.06.2013	18:00	10.06.2013	18:00	48
13.06.2013	17:00	14.06.2013	10:00	17
20.06.2013	13:00	21.06.2013	15:00	26
24.06.2013	10:00	25.06.2013	16:00	30
26.06.2013	16:00	30.06.2013	08:00	88



Abbildung 8: Versuchsplan des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2013. Der Versuch war einmal überdacht und einmal nicht überdacht. Die Varianten unbehandelte Kontrolle (UK), Epoxion und Imbrex wurden jeweils zu den drei Terminen BBCH 32, 39 und 47 behandelt. Jede dieser Kombinationen wurde einmal mit Zymoseptoria tritici und einmal mit Puccinia tritticina inokuliert. Die Kreise stellen die Töpfe dar.

2.1.4.2 Halbfreilandversuch 2014

Im Jahr 2014 wurden die Versuchspflanzen direkt in 15 l-Container (30 cm x 28 cm) ausgesät (Tab. 13). Die Aussaat erfolgte am 12.11.2013 mit 30 Körnern JB Asano pro Topf in Ackerboden (sandiger Lehm, Nieder-Hilbersheim). Die Pflanzen wurden bis zum 08.04.2014 auf einem Feld in Nieder-Hilbersheim kultiviert und dann zum Versuchsgelände in Bad Kreuznach transportiert. Dort wurden sie, wie in Abbildung 9 dargestellt, in Untersetzern aufgestellt.

Standort	Bad Kreuznach
Region	Nahe
Höhe [m ü. NN]	104 m
Zehnjährige Durchschnittstemperatur (2 m)	10,6°C
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	559,7 mm
Wetterstation	Bad Kreuznach, DEULA
Entfernung von der Wetterstation	0,2 km
Sorte	JB Asano
Aussaatdatum	12.11.2013
Auflaufdatum	02.12.2013
Bodenart	sandiger Lehm

Tabelle 13: Kulturdaten des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2014.

2014 wurden insgesamt 24 Versuchsglieder mit je sechs Wiederholungen untersucht (Abb. 9). Die Fungizide wurden zu BBCH 39 und 49 mit einer Rückenspritze mit Spritzgestänge appliziert (siehe Kapitel 2.1.2.1 und Anhang 1.5) (Tab. 14). Nach erfolgter Fungizidbehandlung wurde die Hälfte des Versuchs mit *Z. tritici* künstlich inokuliert (siehe Kapitel 2.1.4.1). Die Inokulation mit *P. triticina* erfolgte wie in Kapitel 2.1.2.4 beschrieben mit Blattsegmenten im Labor.

Die Bonituren begannen ab der Fungizidapplikation. Es wurden fünf markierte Haupthalme pro Topf bonitiert. Die mit *Z. tritici* inokulierten Pflanzen wurden in wöchentlichem Abstand bonitiert. Dabei erfolgte die Bestimmung der Befallshäufigkeit der oberen drei Blattetagen (F bis F-2) für jedes Blatt separat. Zusätzlich wurde an zwei Terminen (zu BBCH 75 und 77) die Befallshäufigkeit pro Topf und Blattetage bonitiert. Dazu erfolgte die Zählung aller ährentragenden Halme pro Topf und die Ermittlung der Befallshäufigkeit für jede der drei oberen Blattetagen. Die Bonitur der mit *P. triticina* inokulierten Blattsegmente wurde wie in Kapitel 2.1.2.4 beschrieben durchgeführt.



Abbildung 9: Versuchsplan des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2014. Der Versuch war einmal überdacht und einmal nicht überdacht. Die Varianten unbehandelte Kontrolle (UK), Epoxion und Imbrex wurden jeweils zu den zwei Terminen BBCH 39 und 49 behandelt. Jede dieser Kombinationen wurde einmal mit*Zymoseptoria tritici* inokuliert. Aus den *Puccinia triticina*-Blöcken wurden Blattproben für eine Inokulation im Labor entnommen. Die Kreise stellen die Töpfe dar.

	BBCH 39	BBCH 49
Applikationstermin	07.05.2014	
BBCH zu Applikation	37-39	
Inokulationen		
16.05.2014	Х	
23.05.2014	Х	
30.05.2014	Х	
06.06.2014	Х	

Tabelle 14: Termine der Inokulationen mit *Zymoseptoria tritici* des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2014 für die Applikationstermine BBCH 32 und 39.

Tabelle 15: Dauer der Überdachung des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2014.

Dach au	sgerollt	Dach eiı	ngerollt	
Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit	Dauer [h]
07.05.2014	15:00	09.05.2014	17:00	50
22.05.2014	13:00	23.05.2014	09:00	20
26.05.2014	11:00	28.05.2014	13:00	50
04.06.2014	13:00	05.06.2014	14:00	25

2.1.5 Halbfreilandversuch zur Kurativwirkung

Um die kurative Wirkung der Fungizide Epoxion und Imbrex auf Z. *tritici* zu untersuchen, wurde ein weiterer Halbfreilandversuch auf dem Gelände des Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück in Bad Kreuznach angelegt. Am 18.12.2013 erfolgte die Aussaat von Winterweizen der Sorte JB Asano in Ackerboden (sandiger Lehm, Nieder-Hilbersheim) mit je 10 Körnern in 10 l-Container (29 x 23 cm) (Tab. 16). Die Töpfe standen bis BBCH-Stadium 11 (1-Blatt-Stadium) am 03.01.2014 bei ca. 20°C im Gewächshaus unter Natriumdampflampen (16/8 Stunden Tag/Nacht-Rhythmus) (siehe Anhang 1.4) und wurden danach im Freiland weiterkultiviert (Abb. 10). Der Abstand der Lampen zu den Pflanzen betrug etwa 80 cm.

Standort	Bad Kreuznach
Region	Nahe
Höhe [m ü. NN]	104 m
Zehnjährige Durchschnittstemperatur (2 m)	10,8°C
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	558,3 mm
Wetterstation	Bad Kreuznach, DLR
Entfernung von der Wetterstation	0,0 km
Sorte	JB Asano
Aussaatdatum	18.12.2013
Auflaufdatum	27.12.2013
Bodenart	sandiger Lehm
Inokulation	09.05.2014
BBCH zum Zeitpunkt der Inokulation	39/41

Tabelle 16: Kulturdaten des Halbfreilandversuchs zur Kurativwirkung.



Abbildung 10: Aufbau des Halbfreilandversuchs zur Kurativwirkung im Jahr 2014.

Mit Erreichen von BBCH-Stadium 39/41 (Ligula-Stadium) wurden die Pflanzen am 09.05.2014 mit Z. *tritici* inokuliert. Die Sporensuspension wurde, wie in Kapitel 2.1.4 erläutert, hergestellt. Jeder Topf wurde mit sechs Sprühstößen (= ca. 11 ml) inokuliert und danach in einem Kunst-stoffbeutel aus Polyethylen luftdicht verpackt, um nahezu 100 % Luftfeuchte zu erhalten. Die Inkubation der Pflanzen erfolgte für 24 Stunden bei 20°C in Dunkelheit. Danach wurden die Plastikbeutel entfernt und die Pflanzen zurück ins Freiland gestellt.

Insgesamt bestand der Versuch aus 13 Versuchsgliedern mit je sechs Wiederholungen (Tab. 17). Die einzelnen Versuchsglieder wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit entweder Epoxion (1,0 l/ha) oder Imbrex (2,0 l/ha) und einer Wasseraufwandmenge von 300 l/ha behandelt. Die Applikationen wurden so geplant, dass die Latenzzeit von *Z. tritici* in den Versuchsgliedern ungefähr zu 0, 20, 30, 40, 50 und 70 % abgelaufen war. Die abgelaufene Latenzzeit seit

Inokulation wurde dynamisch in Abhängigkeit von der Temperatur mit einem Algorithmus aus dem Modell SEPTRI berechnet (Erven, 2011). Die im Nachhinein berechneten, zum Zeitpunkt der Applikation abgelaufenen, Latenzzeiten sind Tabelle 17 zu entnehmen. Die Applikation erfolgte mit einem Rückenspritzgerät mit Spritzgestänge (siehe Kapitel 2.1.2.1 und Anhang 1.5).

Tabelle 17: Versuchsglieder (VG) des Halbfreilandversuchs zur Kurativwirkung mit den genauen Datenund Uhrzeiten der erfolgten Fungizidapplikationen und den geplanten und berechnetenLatenzzeiten von Zymoseptoria tritici zum Zeitpunkt der Applikationen.

VG	Behandlung	geplante Latenzzeit	Datum	Uhrzeit	berechnete Latenzzeit
1	unbehandelt				
2/3	Epoxion bzw. Imbrex	0 %	09.05.2014	10:00	0 %
4/5	Epoxion bzw. Imbrex	20 %	12.05.2014	19:30	19 %
6/7	Epoxion bzw. Imbrex	30 %	14.05.2014	19:30	29 %
8/9	Epoxion bzw. Imbrex	40 %	16.05.2014	15:00	39 %
10/11	Epoxion bzw. Imbrex	50 %	19.05.2014	10:30	55 %
12/13	Epoxion bzw. Imbrex	70 %	21.05.2014	15:00	67 %

Vor Beginn der Bonituren wurde die Anzahl aller ährentragenden Halme pro Topf bestimmt. Bei 100% abgelaufener Latenzzeit von *Z. tritici* wurde mit der Bonitur der Befallshäufigkeit pro Topf und Blattetage begonnen. Dir Bonitur erfolgte für die Blattetagen F bis F-2 aller ährentragenden Halme pro Topf. Die Befallshäufigkeit pro Blattetage wurde anhand der Anzahl befallener Blätter bezogen auf die Gesamtanzahl der Blätter in dem Topf prozentual berechnet. Die Temperatur und relative Luftfeuchte während des gesamten Versuchszeitraums wurde mit Datenloggern (siehe Anhang 1.5) aufgezeichnet.

2.2 Laborversuche

2.2.1 Fungizidwirkung in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration

Um die Wirkung der Fungizide Epoxion und Imbrex sowie einer 50:50-Mischung beider Fungizide auf das Wachstum von Z. *tritici* in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur zu untersuchen, wurde ein Myzelwachstumstest in sterilen 96 Well-Mikrotiterplatten durchgeführt. Z. *tritici* (Isolat Q A7) (siehe Anhang 1.3) wurde auf Gemüsesaftagar (siehe Anhang 1.2) bei 20°C und einem Tag/Nacht-Rhythmus von 12/12 Stunden unter Leuchtstoffröhren

(Sylvania) (siehe Anhang 1.4) kultiviert. Die Herstellung der Sporensuspension erfolgte durch Abwaschen der Sporen von einer sieben Tage alten Pilzkultur mit Glucose-Pepton-Medium (siehe Anhang 1.2) und Einstellen mit Hilfe einer Thomakammer auf 10^5 Sporen/ml. Die Fungizidkonzentrationen von 0 - 0,01 - 0,025 - 0,05 - 0,075 - 0,1 - 0,15 - 0,2 - 0,25 - 0,75 - 1,0 und 10 ppm Wirkstoff wurden ebenfalls in Glucose-Pepton-Medium angesetzt.

In jedes Well wurden 50 µl Sporensuspension und 150 µl Fungizidsuspension pipettiert und vermischt (verändert nach Mehl (2006)). Für die Kontrolle wurde reines Medium mit Sporensuspension gemischt. Die Überprüfung der Sterilität des Mediums erfolgte durch Blanks mit reinem Medium. Für jede Fungizidkonzentration, die Kontrolle und die Blanks wurden jeweils acht Wells befüllt. Nach dem Befüllen wurde die Mirkotiterplatte im Photometer (siehe Anhang 1.5) bei einer Wellenlänge von 405 nm gemessen und anschließend mit einer sterilen, luftdurchlässigen Kunstseidenfolie (siehe Anhang 1.4) verschlossen (verändert nach Stammler und Speakman (2006)). Nach sechs Tagen Inkubation bei 15, 20 und 25°C im Dunkeln erfolgte die Messung des Wachstums bei 405 nm im Photometer.

Die Versuche wurden für jede Temperaturstufe insgesamt drei- bis viermal wiederholt. Für die Auswertung wurden die Werte durch einen Vergleich mit den Blanks korrigiert, um das tatsächliche Wachstum zu bestimmen. Für jeden Wert wurde der Wirkungsgrad im Bezug auf die unbehandelte Kontrolle wie folgt berechnet:

WG [%] =
$$100 \times \frac{\text{Wert}_{\text{UK}} - \text{Wert}_{\text{F}}}{\text{Wert}_{\text{UK}}}$$
 (2.4)

In dieser Formel steht WG für den Wirkungsgrad in %, UK für den Messwert der unbehandelten Kontrolle und F für den Messwert des Fungizidversuchsglieds.

Die Wirkungsgrade wurden mit folgender logistischer Funktion angepasst:

$$f = \frac{a}{1 + \exp\left[-(x - c)/b\right]}$$
(2.5)

wobei f für den angepassten Wirkungsgrad in % steht, x die Wirkstoffkonzentration in ppm ist und a, b und c Formparameter sind.

2.2.2 Fungizidwirkungsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur

Mit dem Ziel, den Einfluss der Temperatur auf die Wirkungsdauer der Fungizide Epoxion und Imbrex zu untersuchen, wurde ein Mikrotitertest mit *Z. tritici* durchgeführt. In Glucose-Pepton-Medium (siehe Anhang 1.2) wurden Fungizidsuspensionen mit Konzentrationen von 1,0 und 2,1 ppm (= 10% der Feldaufwandmenge) hergestellt. Von jeder Konzentration wurden 150 μ l in acht Wells einer 96 Well-Mikrotiterplatte pipettiert und so insgesamt acht Mikrotiterplatten angesetzt. Die Platten wurden mit einem Deckel luftdicht verschlossen und bei 20 beziehungsweise 30°C im Dunkeln gelagert. Nach 7, 13, 21 und 37 Tagen wurden die Platten bei 405 nm im Photometer gemessen.

Danach wurden 50 µl Sporensuspension von Z. *tritici* (Isolat Q A7) (siehe Anhang 1.3) zu den Fungizidsuspensionen hinzugefügt. Die Herstellung der Sporensuspension erfolgte wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Außerdem wurden eine Positivkontrolle (150 µl reines Glucose-Pepton-Medium + 50 µl Sporensuspension), eine Negativkontrolle (150 µl reines Glucose-Pepton-Medium) aufgetragen. Die Platte wurde dann mit luftdurchlässiger Kunstseidenfolie (siehe Anhang 1.4) verschlossen und im Dunkeln bei 20 beziehungsweise 30°C inkubiert. Nach sechs Tagen erfolgte die Messung des Wachstums bei 405 nm im Photometer. Für die Auswertung wurde jeder Wert durch einen Vergleich mit den Blanks korrigiert, um das tatsächliche Wachstum zu bestimmen.

2.3 Statistische Auswertung

Die Versuchsdaten wurden mit Excel 2007 (Microsoft Corporation, Redmond, USA) in Tabellenform erfasst. Die statistische Auswertung der Versuche erfolgte mit XLSTAT 2012.1.02 (Addinsoft, Paris, Frankreich) und SigmaPlot 10.0 (Systat Software GmbH, Erkrath). Die Grafiken wurden mit den Programmen Excel oder SigmaPlot angefertigt.

Für die Auswertung der Freilandversuche wurden aus den Befallshäufigkeiten der Pathogene AUDPC-Werte (area under the disease progress curve) berechnet. Die folgende Gleichung zeigt die Berechnung des AUDPC-Wertes (Campbell und Madden, 1990):

AUDPC =
$$\sum_{i=1}^{n-1} (t_{i+1} - t_i) \frac{y_i + y_{i+1}}{2}$$
 (2.6)

wobei n die Anzahl Erhebungen ist, i für den Erhebungszeitpunkt steht, für y die Befallshäufigkeit in % einzusetzen ist und t die Anzahl der Tage nach Boniturbeginn beschreibt.

Je mehr Boniturtermine in die Berechnung einfließen, desto größer wird der AUDPC-Wert, da es sich um eine Summe handelt. Bei den Freilandversuchen wurden jedoch nicht an jedem Standort und in jedem Jahr gleich viele Bonituren durchgeführt. Um die Standorte und Jahre trotzdem miteinander vergleichen zu können, erfolgte eine Berechnung der standardisierten AUDPC-Werte aus den absoluten AUDPC-Werten. Dafür wurde der absolute AUDPC-Wert

durch die Anzahl der Tage des gesamten Boniturzeitraumes wie folgt geteilt (Campbell und Madden, 1990):

$$sAUDPC = \frac{AUDPC}{t_n - t_1}$$
(2.7)

wobei n die Anzahl Erhebungen ist, i für den Erhebungszeitpunkt steht, für y die Befallshäufigkeit in % einzusetzen ist und t die Anzahl der Tage nach Boniturbeginn beschreibt.

Für den Vergleich mehrerer Stichproben, zum Beispiel von sAUDPC-Werten, wurde das Verfahren der Varianzanalyse mit Tukey-Test angewendet. Die beiden Voraussetzungen für eine Varianzanalyse - Normalverteilung und Varianzhomogenität - wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test beziehungsweise dem Levene-Test überprüft. Erfüllten die zu analysierenden Daten eine oder beide dieser Voraussetzungen nicht, wurden die Daten transformiert (zum Beispiel mit Wurzeltransformation oder Arcus-Sinus-Transformation). War die Transformation nicht zielführend, wurde der nichtparametrische Kruskal-Wallis-Test mit Dunn post-hoc-Prozedur durchgeführt. In einigen Fällen erfolgte trotz des Verstoßes gegen die Voraussetzungen die Durchführung einer Varianzanalyse. Gerade bei Daten mit biologischem Hintergrund und häufig relativ wenigen Daten pro Wiederholung ist es erlaubt, trotz nicht normalverteilter Daten, eine Varianzanalyse durchzuführen (van Emden, 2008). Laut Cochran (1947) hat eine Abweichung von der Normalverteilung nur einen geringen Effekt auf Fehler 1. Art. Ein Fehler 1. Art liegt vor, wenn die Nullhypothese abgelehnt wird, obwohl sie wahr ist. Die Voraussetzung der Varianzhomogenität ist vor allem bei ungleichen Stichprobengrößen wichtig. Bei gleichen Stichprobengrößen, wie sie in dieser Arbeit vorliegen, ist die Varianzanalyse jedoch robust gegen Varianzinhomogenität (Lix et al., 1996).

2.4 Modellentwicklung

2.4.1 Berechnung der Infektionswahrscheinlichkeit von Zymoseptoria tritici

Die Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* wurde auf Basis der Daten von Magboul et al. (1992) berechnet. Hierfür wurde der Einfluss von Temperatur und Blattnässeperiode auf die Anzahl der Läsionen von *Z. tritici* zunächst einzeln betrachtet. Die Anzahl der Läsionen wurde für die Berechnungen an dem jeweiligen Maximum relativiert.

Der Einfluss der Temperatur wurde mit einer Beta-Hau-Funktion (Hau, 1988) angepasst:

$$\operatorname{Inf}_{(T)} = \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\operatorname{opt}} - T_{\min}}\right)^{n \times \frac{T_{\operatorname{opt}} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\operatorname{opt}}}} \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\operatorname{opt}}}\right)^{n}$$
(2.8)

wobei $Inf_{(T)}$ die Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Temperatur *T* beschreibt und T_{min} , T_{max} und T_{opt} jeweils die minimale, maximale und optimale Temperatur darstellen und *n* der Formparameter ist. Für T_{min} und T_{max} wurde mit festen Parameterwerten gerechnet. Die Temperaturgrenzen wurden nach Literaturangaben auf eine minimale Temperatur von 2°C und eine maximale Temperatur von 30°C festgelegt (Weber, 1922; Shaner und Finney, 1976; Magboul et al., 1992; Hoffmann und Schmutterer, 1999).

Der Einfluss der Blattnässeperiode auf die Anzahl der Läsionen von Z. *tritici* wurde mittels logistischer Regression berechnet:

$$Inf_{(BN)} = (1 + \exp[-(a + bx)])^{-1}$$
(2.9)

wobei $Inf_{(BN)}$ die Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Blattnässeperiode *x* ist und *a* und *b* Formparameter beschreiben.

Durch Multiplikation der beiden Gleichungen (2.9 und 2.10) wurde die Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* in Abhängigkeit von beiden Parametern - Temperatur und Blattnässeperiode - berechnet. Es ergibt sich daraus Gleichung 2.10.

$$Inf_W = Inf_{(T)}Inf_{(BN)}$$
(2.10)

Für die Berechnung der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* an den verschiedenen Versuchsstandorten wurden stündlich interpolierte Wetterdaten (Zeuner, 2007; Racca et al., 2011) verwendet. Die stündliche Blattnässe wurde mit stündlichen Werten für die relative Luftfeuchte, die Temperatur und den Niederschlag als Hilfsparameter berechnet. Die Berechnung der Funktion für die Kalkulation der Blattnässe erfolgte mit einem 10-jährigem Wetterdatensatz (1996-2006) von zehn ausgewählten Wetterstationen in Rheinland-Pfalz (n = 876000). Mit Hilfe einer linearen Diskriminanzanalyse wurden die trockenen oder nassen Stunden in Abhängigkeit von der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und des Niederschlages anhand folgender Formel geschätzt [Racca, P. (2007), unveröffentlicht]:

$$BN_D = a + bT + crL + dNN \tag{2.11}$$

wobei BN_D der Diskriminanzwert für die Blattnässe ist, *T* die stündliche Temperatur in °C beschreibt, *rL* die stündliche Luftfeuchte in % ist, NN den Niederschlag in mm darstellt

und schließlich *a*, *b*, *c* und *d* Formparameter sind. Die Parameterwerte für die Funktion sind Tabelle 18 zu entnehmen.

Wert	p-Wert
-7,118	< 0,001
0,028	< 0,001
0,086	< 0,001
0,095	< 0,001
	Wert -7,118 0,028 0,086 0,095

Tabelle 18: Geschätzte Regressionskoeffizienten der Blattnässeberechnung (Gleichung 2.11).

Die besten Ergebnisse wurden mit einem Trennwert von -0,245 (Mittelwert der beiden Zentroide) erzielt. Damit wurde eine korrekte Klassifikation von 74% für trockene und von 92% für nasse Stunden erreicht (Racca, P. (2007), unveröffentlicht). Ist der berechnete Diskrimanzwert BN_D kleiner als der Trennwert von -0,245, wird die Stunde als "nass" klassifiziert. Bei Diskriminanzwerten, die größer sind als der Trennwert, wird die Stunde als "trocken" klassifiziert.

Die Blattnässeperiode wird durch Aufsummierung aufeinanderfolgender Stunden mit Blattnässe berechnet. Bei einer oder mehreren Stunden ohne Blattnässe wird die Blattnässeperiode unterbrochen. Die Berechnung beginnt mit der nächsten Blattnässestunde erneut von Null. Für die Temperatur während der Blattnässeperiode wird der stündliche Temperaturmittelwert verwendet. Mit fünf Korrekturregeln wurde die Blattnässeberechung weiter justiert (Palm, G. (2012); persönliche Mitteilung). Trifft eine der fünf Regeln zu, wird diese Stunde als "nass" gewertet.

- 1. Wenn die berechnete Blattnässe = 0 ist und die relative Luftfeuchte > 90% und die Trockenphase zwischen zwei Blattnässeperioden ≤ 16 Stunden, dann nass, sonst trocken.
- 2. Wenn die berechnete Blattnässe = 0 ist und die relative Luftfeuchte $\leq 90\%$ und $\geq 70\%$ und die Trockenphase zwischen zwei Blattnässeperioden ≤ 12 Stunden, dann nass, sonst trocken.
- Wenn die berechnete Blattnässe = 0 ist und die relative Luftfeuchte < 70% und die Temperatur ≥ 15°C und < 20°C und die Trockenphase zwischen zwei Blattnässeperioden ≤ 10 Stunden, dann nass, sonst trocken.
- 4. Wenn die berechnete Blattnässe = 0 ist und die relative Luftfeuchte < 70% und $\ge 20^{\circ}$ C und die Trockenphase zwischen zwei Blattnässeperioden ≤ 8 Stunden, dann nass, sonst trocken.

5. Wenn die berechnete Blattnässe = 0 ist und der Niederschlag > 0 mm, dann nass, sonst trocken.

2.4.2 Berechnung der Fungizidwirkungsdauer

Die Ausbreitung von Z. tritici verläuft zunächst horizontal im Bestand (Lovell et al., 1997). Das bedeutet es kommt zu einem Anstieg der Befallshäufigkeit durch neue Infektionen. Erst danach nimmt die Befallsstärke durch das Wachstum der Läsionen zu. Untersuchungen von Werner (1999) zeigen, dass die Befallsstärke von P. recondita bis zu einer Befallshäufigkeit von 90% unter 2% liegt. Für Befallshäufigkeiten kleiner 60% wurden bei Erysiphe graminis f. sp. hordei Befallsstärken von 1,5% festgestellt (Koch, 1978). Laut Jörg und Krauthausen (1994) liegt auch für Z. tritici eine signifikante und stabile Befallshäufigkeit-Befallsstärke-Beziehung vor. Ein Prozent Befallsstärke von Z. tritici entspricht einer Befallshäufigkeit von etwa 33%. Analytis und Kranz (1972) veröffentlichten eine Studie, der zufolge die Korrelation von Befallsstärke und Befallshäufigkeit bei Venturia inaequalis und Cronartium ribicola so groß ist, dass sich die Befallsstärke aus der Befallshäufigkeit ableiten lässt. Weiter ist zu beachten, dass die Befallshäufigkeit, bezogen auf die Anfälligkeit für fehlerhafte Bonituren, ein wesentlich robusterer Parameter ist (Analytis und Kranz, 1972). Aus den oben genannten Gründen wird in dieser Arbeit zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer die Befallshäufigkeit und nicht die Befallsstärke als Parameter herangezogen. Denn die Fungizidwirkungsdauer ist als beendet zu betrachten, wenn Sporen das Blatt wieder erfolgreich neu infizieren können und nicht erst dann, wenn die Größe der Läsionen zunimmt.

Für die Berechnung der Fungizidwirkungsdauer wurden die Daten zunächst in protektiv und kurativ behandelte Blattetagen eingeteilt. Protektiv wird dabei definiert als: Das Fungizid ist auf oder in der Pflanze bevor das Pathogen landet oder beginnt sich zu entwickeln. Kurativ bedeutet, dass das Fungizid im Pflanzengewebe ist und frühes Wachstum des Pathogens stoppt, bevor Symptome sichtbar werden (siehe Kapitel 1.2).

Für die Einteilung der Daten wurde der Infektionszeitpunkt der jeweiligen Blattetagen mit Hilfe des Erstauftretens von Z. *tritici* in der unbehandelten Kontrolle berechnet. Von dem Zeitpunkt des bonitierten Erstauftretens wurde die Latenzzeit vonZ. *tritici* rückwärts gerechnet und so das Datum der Infektion bestimmt. Für die Berechnung der Latenzzeit wurde ein Algorithmus aus dem Modell SEPTRI verwendet (Erven, 2011). Dieser berechnet die Latenzzeit von Z. *tritici* nach erfolgreicher Infektion anhand der Tagesmitteltemperatur. Die unterschiedliche Sortenanfälligkeit wird durch einen Sortenfaktor berücksichtigt.

Da die Bonituren der Parzellenversuche in einem Intervall von sieben Tagen durchgeführt wurden, kann das tatsächliche Erstauftreten zwischen dem ersten Tag nach der vorherigen Bonitur und dem Tag der Bonitur des Erstauftretens liegen. Aus diesem Grund kann der Infektionszeitpunkt nur mit einer Genauigkeit von -6 bis 0 Tagen berechnet werden. Um die Genauigkeit des berechneten Infektionszeitpunktes zu verbessern, wurde dieser mit Hilfe der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* (siehe Kapitel 2.4.1) überprüft. Ist für den berechneten Infektionszeitpunkt keine Infektionswahrscheinlichkeit berechnet worden, wurde der Infektionszeitpunkt auf das nächstliegende Datum mit einer Infektionswahrscheinlichkeit korrigiert.

Blattetagen, bei denen der korrigierte Infektionszeitpunkt vor der Fungizidapplikation lag, wurden als kurativ eingestuft. Außerdem wurde für diese Daten anhand der Dauer der Latenzzeit bestimmt, wie viel Prozent der Latenzzeit zum Applikationstermin bereits abgelaufen waren.

Blattetagen, bei denen der berechnete Infektionszeitpunkt nach dem Applikationstermin lag, wurden als protektiv betrachtet. Da in den Parzellenversuchen nur sehr wenige protektiv behandelte Blattetagen erzeugt wurden, wurden kurativ behandelte Blattetagen mit 30% oder weniger abgelaufener Latenzzeit ebenfalls als protektive verwendet. Dazu wurden die Befallsverläufe von Einzelpflanzen, die kurativ behandelt wurden, entfernt. Das heißt, es wurden alle Befallsverläufe entfernt, bei denen ein Erstauftreten bonitiert wurde, welches durch eine Neuinfektion vor dem Applikationstermin hervorgerufen wurde. Dieser Vorgang wurde für alle Fungizidvarianten durchgeführt. Für die unbehandelte Kontrolle fanden die unveränderten Befallsverläufe Verwendung.

2.4.2.1 Protektive Wirkungsdauer

Für die Berechnung der protektiven Wirkungsdauer wurde der aus den 100 Einzelpflanzen pro Versuchsglied gebildete Mittelwert der Befallshäufigkeiten verwendet und dann an seinem jeweiligen Maximum relativiert. Danach wurden die relativierten Befallsverläufe mit Hilfe einer logistischen Regression angepasst (Gleichung 2.5), um eine tägliche Befallshäufigkeit zu erhalten. So konnten die weiteren Berechnungen unabhängig von dem einwöchigen Boniturintervall durchgeführt werden.

Im nächsten Schritt wurden die täglichen Differenzen der angepassten Befallshäufigkeiten zwischen den Einzeltagen für die unbehandelte Kontrolle und die Fungizidvarianten berechnet (Gleichungen 2.12 und 2.13). Dann wurde die tägliche Differenz der Fungizidvariante von der täglichen Differenz der unbehandelten Kontrolle subtrahiert (Gleichung 2.14). Wenn diese

Differenz gleich Null ist, ist die Steigung und somit der Befallsanstieg in der Kontrolle und der Fungizidvariante gleich. Zu diesem Zeitpunkt ist die Fungizidwirkungsdauer rechnerisch beendet.

$$\Delta BH_{UK} = BH_{UKt} - BH_{UKt-1} \tag{2.12}$$

$$\Delta BH_F = BH_{Ft} - BH_{Ft-1} \tag{2.13}$$

wobei ΔBH_{UK} beziehungsweise ΔBH_F die Differenz der Befallshäufigkeiten zwischen den Einzeltagen für die unbehandelte Kontrolle beziehungsweise die Fungizidvariante ist, BH_t die Befallshäufigkeit in % zum Zeitpunkt *t* beschreibt und dementsprechend BH_{t-1} die Befallshäufigkeit in % zum Zeitpunkt *t* – 1 ist.

$$Z\Delta_0 = \Delta B H_F - \Delta B H_{UK} \tag{2.14}$$

wobei $Z\Delta_0$ die Differenz zwischen Fungizidvariante und unbehandelter Kontrolle ist, ΔBH_F die Differenz der Befallshäufigkeit der jeweiligen Fungizidvariante beschreibt und ΔBH_{UK} für die Differenz der Befallshäufigkeit der unbehandelten Kontrollen steht.

Von diesem Zeitpunkt wurde im letzten Schritt die Latenzzeit subtrahiert (Gleichung 2.15), denn die Fungizidwirkung ist bereits zu dem Zeitpunkt beendet gewesen, an dem Z. *tritici* das Blatt neu infizieren konnte (siehe Kapitel 2.4.2). Die Dauer der Latenzzeit wurde dynamisch in Abhängigkeit von der Temperatur mit Hilfe eines Algorithmus aus dem Modell SEPTRI berechnet (Erven, 2011).

$$FWD = Z\Delta_0 - LTZ \tag{2.15}$$

wobei FWD die Fungizidwirkungsdauer ist, $Z\Delta_0$ die Differenz zwischen Fungizidvariante und unbehandelter Kontrolle und LTZ die Latenzzeit von Z. *tritici*. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der Fungizidwirkungsdauer ist in Abbildung 11 schrittweise graphisch dargestellt.

2.4.2.2 Kurative Wirkungsdauer

Für die Bestimmung der kurativen Fungizidwirkung wurden die Daten der Parzellenversuche (siehe Kapitel 2.1.2) und des Halbfreilandversuchs zur Kurativwirkung (siehe Kapitel 2.1.5) verwendet. Berücksichtigung fanden nur Datensätze, bei denen der Infektionszeitpunkt der unbehandelten Kontrolle vor dem Applikationsdatum lag und bei denen die Latenzzeit noch nicht 100% erreicht hatte. Um die kurative Wirkung der Fungizide zu bestimmen, wurde für die Fungizidversuchsglieder ebenfalls überprüft, ob der berechnete Infektionszeitpunkt von



1. Anpassung der Befallshäufigkeit mit logistischer Funktion (Gleichung 2.5)

















Abbildung 11: Vorgehensweise bei der Berechnung der Fungizidwirkungsdauer am Beispiel der Boniturdaten von *Zymoseptoria tritici* für die unbehandelte Kontrolle (UK) und die Fungizidmischung Epoxion + Imbrex des Standortes Bied13 auf dem Fahnenblatt.

Z. tritici zeitlich vor oder nach der Applikation lag. Hierfür wurde die Latenzzeit von *Z. tritici* ab dem bonitierten Erstauftreten rückwärts gerechnet, wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben.

Lag der berechnete Infektionszeitpunkt vor der Applikation, hatte das Fungizid keine kurative Wirkung, da die Infektion nicht durch das Fungizid gestoppt werden konnte. Lag der Infektionszeitpunkt erst nach der Applikation, konnte eine kurative Wirkung des Fungizids bestätigt werden. Das Fungizid hat in diesem Fall eine kurative Wirkung, weil die Infektion, die vor der Applikation stattgefunden hat (wie aus den Daten der unbehandelten Kontrollen hervorgeht), gestoppt werden konnte. Das Erstauftreten wurde also erst so spät bonitiert, dass die Infektion des Blattes nach der Applikation erfolgt sein muss.

2.4.3 Einteilung der Fungizide in verschiedene Wirkungsgruppen

Die Datengrundlage für die Entwicklung des Modells basiert auf insgesamt drei verschiedenen Fungizidprodukten mit jeweils einem Solowirkstoff und einer 50:50-Fungizidmischung aus zwei Produkten (= zwei Wirkstoffe) (siehe Kapitel 2.1.2). Ziel dieser Arbeit jedoch war es, ein Modell zu entwickeln, das für alle auf dem Markt verfügbaren Fungizide angewendet werden kann.

Um das Modell für möglichst viele Produkte und auch Tankmischungen einsetzbar zu machen, wurden drei Wirkungsgruppen für die Produkte festgelegt. Die Wirkungsgruppen orientieren sich an den Fungizidbewertungstabellen der PSD. In diesen Tabellen wird die Wirkung neuer sowie altbewährter, praxisrelevanter Fungizide jährlich neu von Pflanzenschutzexperten bewertet. Die Wirkung der Fungizide wird mit Hilfe von Kreuzchen bewertet. Je mehr Kreuzchen, desto besser ist die Wirkung. Da die maximale Anzahl der Kreuzchen dieser Tabellen von Bundesland zu Bundesland sehr unterschiedlich sein kann, wurden die Tabellen zur Nutzung für das Modell vereinheitlicht. Hierfür wurde eine Vorlage erarbeitet, in die Experten jeden Bundeslandes ihre Einschätzungen eingetragen haben. Die vereinheitlichte Tabelle enthält fünf Wirkungsgruppen (Tab. 19). Um die in dieser Arbeit verwendeten Produkte Wirkungsgruppen zuzuordnen, wurde der Mittelwert der vereinheitlichen Tabellen aller Bundesländer herangezogen.

2.4.4 Methode zur Modellierung der Fungizidwirkungsdauer

Für die Modellierung der protektiven Wirkungsdauer wurde das Verfahren der binären multiplen logistischen Regression gewählt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die Abhängigkeit

Anzahl Kreuzchen	Wirkungsgruppe
0	keine Wirkung
1	Nebenwirkung
2	mittlere Wirkung
3	gute Wirkung
4	sehr gute Wirkung

Tabelle 19: Vereinheitlichte Tabelle zur Bewertung der Fungizidwirkung auf Basis der Fungizidbewertungstabellen der Pflanzenschutzdienste der Länder.

einer dichotomen Variable von anderen unabhängigen Variablen zu untersuchen (Bühl, 2008; Albers et al., 2009).

Für die binäre multiple logistische Regression wurden die protektiv behandelten Blattetagen mit dazugehörigen berechneten Fungizidwirkungsdauern verwendet. Die Daten wurden zunächst in die beiden Wirkungsgruppen "mittel" (Bravo, Epoxion) und "sehr gut" (Imbrex, Epoxion+Imbrex) eingeteilt (siehe Kapitel 2.4.3). Innerhalb einer Wirkungsgruppe wurde jeder Datensatz wiederum in zwei Klassen geteilt. Klasse 0 "Wirkungsdauer noch nicht beendet" beinhaltet die Werte vom Applikationstag, bis zum Tag des berechneten Wirkungsendes. Klasse 1 "Wirkungsdauer beendet" enthält die Werte ab dem Tag des Wirkungsendes bis zum Ende der Bonituren. Außerdem wurde jeder Datensatz mit den dazugehörigen Wetterdaten ergänzt. Verwendet wurden die ab dem Applikationsdatum aufsummierten Werte der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, des Niederschlags und der Globalstrahlung. Mit den so aufbereiteten Daten wurde für jede Wirkungsgruppe eine binäre multiple logistische Regression lautet wie folgt:

$$D_{WG} = \left[1 + \exp\left(a + bx + cx_1 \dots + nx_n\right)\right]^{-1}$$
(2.16)

wobei D_{WG} der Diskriminanzwert für die Wirkungsgruppe ist, x_1 bis x_n für Wetterparameter stehen und a, b, c bis z einfache Formparameter sind.

Der Trennwert einer binären logistischen Funktion wird üblicherweise als Anteil der abhängigen Variable für die Ausprägung y = 1 berechnet (Cramer 1999, S. 85 in Albers et al. (2009)). Werte die über dem Trennwert liegen, werden der Klasse "1" zugeordnet, Werte die kleiner als der Trennwert sind, der Klasse "0". Da das Modell in dieser Arbeit jedoch nicht nur unter dem mathematischen, sondern auch unter dem biologischen Aspekt betrachtet werden muss, wurde der Trennwert mit der besten Kombination aus Trefferquote und niedrigster Anzahl Überschätzungen gewählt. Dieser Trennwert wurde iterativ bestimmt.

Die Bestimmheitsmaße (Pseudo-R²) von McFadden, Cox and Snell und Nagelkerke geben den Anteil der durch die Regression erklärten Varianz an. Werte nahe Null bedeuten, dass die Parameter keinen Einfluss auf das Modell haben. Werte nahe Eins zeigen an, dass die Parameter einen hohen Einfluss auf das Modell haben (Albers et al., 2009).

Weitere Kriterien für die Güte des Modells sind die ROC-Kurve beziehungsweise der AUC-Wert. In der ROC-Kurve (<u>Receiver Operating Characteristic</u>) wird die Richtig-Positive-Rate gegen die Falsch-Positive-Rate aufgetragen (Madden et al., 2007). Der AUC-Wert (<u>Area</u> <u>Under ROC-Curve</u>) gibt die Trennschärfe des Modells an. Beträgt der AUC-Wert eins, handelt es sich um perfektes Modell. AUC-Werte nahe 0,5 bedeuten, dass kein Zusammenhang zwischen den Daten besteht (Racca et al., 2011).

Da für Wirkungsgruppe "gut" keine Daten aus den Parzellenversuchen vorliegen, wurde die Modellfunktion aus denen der Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" berechnet. Dazu wurde der Mittelwert der für die Funktionen von Wirkungsgruppe "mittel" und "sehr gut" berechneten Regressionskoeffizienten gebildet. Das entwickelte Modell erhielt den Namen OPTIFUNG.

2.4.5 Entwicklung von Validierungsmethoden

Eine Validierung mit der für epidemiologische Modelle üblichen Methode war nicht möglich, da die Validierungsversuche (siehe Kapitel 2.1.3) statistisch nicht ausgewertet werden konnten. Aus diesem Grund wurde für das Modell keine klassische Validierung durchgeführt. Für einzelne Teile des Modells wurden jedoch alternative Methoden zur Validierung entwickelt.

2.4.5.1 Berechnete Wirkungsdauer

Um die Ergebnisse der berechneten Wirkungsdauer (siehe Kapitel 2.4.2.1) zu überprüfen, wurden zwei verschiedene Methoden angewendet. Die erste Methode ist die Überprüfung des berechneten Wirkungsendes mit Hilfe der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici*. Bei der zweiten Methode werden die Ergebnisse der Wirkstoffgehalte in den Blättern zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes und die Ergebnisse der Mikrotitertests miteinander verglichen.

Infektionswahrscheinlichkeit. Mit Hilfe der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* (siehe Kapitel 2.4.1) wurde für jeden Datensatz mit Hilfe des Erstauftretens überprüft, ob

an dem Datum, an dem das berechnete Ende der Wirkungsdauer des jeweiligen Fungizids lag, eine Infektion mit *Z. tritici* möglich war (Tab. 36). Denn ab dem Zeitpunkt, ab dem die Wirkung des Fungizids beendet ist, muss eine Infektion des Blattes wieder möglich sein. Nach diesem Schema wurde jeder Datensatz, für den eine protektive Wirkungsdauer berechnet wurde (siehe Kapitel 2.4.2.1), überprüft. Dann wurde die Abweichung in Tagen zwischen dem Datum des berechneten Wirkungsendes und dem Datum einer möglichen Infektion berechnet.

Als korrekt wurden Abweichungen von 0 +/- 1 Tag von dem berechneten Infektionsdatum eingestuft. Berechnete Wirkungsdauern, die mehr als einen Tag nach einer möglichen Infektion lagen, werden als Überschätzung gewertet. Fälle, bei denen die berechnete Wirkungsdauer beendet war, bevor es zu einer neuen Infektion kommen konnte, werden als Unterschätzung bewertet.

Wirkstoffgehalte in den Blättern und Myzelwachstumstests. Mit Hilfe der gemessenen Wirkstoffgehalte in den Blättern des Parzellenversuchs am Standort Rose13 (siehe Kapitel 2.1.2.2) wurde überprüft, wie viel Wirkstoff zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes noch in den Blättern vorhanden war. Dazu wurde die Wirkstoffmenge zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes mit Hilfe einer Exponentialfunktion bestimmt (siehe Kapitel 2.1.2.2). Dann wurde diese Wirkstoffmenge an der direkt nach der Applikation gemessenen Ausgangsmenge relativiert.

Anhand der Ergebnisse der Myzelwachstumstests wiederum wurde die Plausibilität der Wirkstoffmengen zum berechneten Wirkungsende überprüft. Dafür wurden die Wirkstoffkonzentrationen ermittelt, die benötigt wurden, um bei einer Durchschnittstemperatur von 15°C eine Wirkung von 99,9% gegen Z. *tritici* zu erzielen (siehe Kapitel 2.2.1). Für diesen Vergleich wurde die Temperaturstufe 15°C gewählt, da diese am besten mit den in Deutschland vorherrschenden Tagesmitteltemperaturen in den epidemiologisch wichtigen Monaten April bis Juni übereinstimmt. Die Wirkstoffmengen zum berechneten Wirkungsende wurden dann mit den in den Myzelwachstumstests ermittelten Konzentrationen verglichen. Außerdem wurde bestimmt, um welchen Faktor sich die Wirkstoffmengen unterscheiden.

2.4.5.2 Prognostizierte Wirkungsdauer mit dem Modell OPTIFUNG

Für die Überprüfung der Ergebnisse für die prognostizierte Wirkungsdauer (siehe Kapitel 2.4.4) wurden ebenfalls zwei verschiedene Methoden angewendet. Zum einen wurde die Wirkungsdauer für ausgewählte Validierungsversuche mit dem Modell berechnet und dann durch genaue Analyse der Bontiurdaten und der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici*

bewertet (Einzelfallanalysen). Zum anderen wurden die Summen der Wetterparameter zum Zeitpunkt des berechneten beziehungsweise des prognostizierten Wirkungsendes verglichen.

Einzelfallanalysen. Die Einzelfallanalysen wurden für die Standorte der Validierungsversuche in Nordrhein-Westfalen 2013 und Brandenburg 2013 durchgeführt. Anhand der Boniturdaten wurde genau analysiert, ob die Behandlung der betrachteten Blattetage protektiv oder kurativ erfolgt ist, wann auf der Blattetage in welchen Versuchsgliedern das Erstauftreten von *Z. tritici* war und ob die berechnete Wirkungsdauer zur Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* passt.

Vergleich der Wetterparameter. Um zu überprüfen, ob die prognostizierten Wirkungsdauern des Modells plausibel sind, erfolgte ein Vergleich der Summen der Wetterparameter Temperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte zum Zeitpunkt des berechneten beziehungsweise prognostizierten Wirkungsendes.

Für das berechnete Wirkungsende wurden die Ergebnisse der Wirkungsdauerberechnug mit den protektiv behandelten Blattetagen der Parzellenversuche genutzt (siehe Kapitel 2.4.2). Daten für das prognostizierte Wirkungsende wurden durch Berechnung der Wirkungsdauer für die Validierungsversuche mit dem Modell berechnet (siehe Kapitel 2.4.4). Hierfür wurden nur Datensätze verwendet, bei denen genug Bonituren vorlagen, um die ungefähre Wirkungsdauer abschätzen zu können.

2.4.6 Begriffsdefinitionen

Berechnete Fungizidwirkungsdauer. Der Begriff "berechnete Fungizidwirkungsdauer" wird in dieser Arbeit für die Wirkungsdauer verwendet, die mit der in Kapitel 2.4.2.1 beschriebenen Methode berechnet wurde. Es handelt sich also um die Wirkungsdauer, die anhand der in den Parzellenversuchen erfassten Befallsverläufe berechnet wurde.

Prognostizierte Fungizidwirkungsdauer. Der Begriff "prognostizierte Fungizidwirkungsdauer" wird in dieser Arbeit für die Wirkungsdauer verwendet, die mit dem Modell OP-TIFUNG berechnet wurde. Es handelt sich also um die Wirkungsdauer, die anhand von unabhängigen Wetterdaten prognostiziert wurde. Die Methode ist in Kapitel 2.4.4 beschrieben.

Infektionswahrscheinlichkeit. Der Begriff "Infektionswahrscheinlichkeit" wird in dieser Arbeit für die berechnete Wahrscheinlichkeit einer Infektion von *Z. tritici* an einem bestimmten Datum verwendet. Die Infektionswahrscheinlichkeit wird mit der in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Methode berechnet.

Infektionsdatum. Der Begriff "Infektionsdatum" wird in dieser Arbeit für das berechnete Datum verwendet, an dem die Infektion mit *Z. tritici* stattgefunden hat. Berechnet wird das Infektionsdatum mit der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Methode.

I^N diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Labor- und Freilandversuche sowie die Modellentwicklung und -validierung vorgestellt.

3.1 Wirkungsdauer in Abhängigkeit vom Niederschlag

In den Halbfreilandversuchen zur Wirkungsdauer in Abhängigkeit vom Niederschlag des Jahres 2013 konnte sowohl in den unbehandelten Kontrollen als auch in den Fungizidvarianten Epoxion und Imbrex, erst gegen Ende des Versuchs nur sehr geringer Befall mit *Z. tritici* erzeugt werden. Die Befallshäufigkeiten lagen in den unbehandelten Kontrollen zwischen 0 und maximal 30% auf den Fahnenblättern und zwischen 17 und 82% auf der Blattetage F-1 (Daten siehe Anhang Tab. 41 und 42). Das Erstauftreten von *Z. tritici* war auf den Blattetagen F und F-1 in den meisten unbehandelten Kontrollen am 04.07.2013 festzustellen. In den meisten Fungizidvarianten war das Erstauftreten zeitgleich mit dem der unbehandelten Kontrollen oder es trat bis zum Boniturende gar kein Befall auf. Es waren keine Unterschiede zwischen den überdachten und nicht überdachten Varianten erkennbar. Die nicht überdachten Versuchsglieder konnten außerdem am 11.07.2013 bereits nicht mehr bonitiert werden, da alle Pflanzen abgestorben waren (Daten siehe Anhang Tab. 42). Aus diesen Gründen kann keine Aussage zur Wirkungsdauer der Fungizide aus diesem Versuch abgeleitet werden.

Der Halbfreilandversuch im Jahr 2014 zeigte ein ähnliches Bild wie der des Vorjahres. Erst zu BBCH 75, dem letzten Boniturtermin, trat ein leichter Befall mit *Z. tritici* auf. Die Befallshäufigkeit in den unbehandelten Kontrollen lag auf den Blattetagen F und F-1 zwischen 0 und maximal 20% (Daten siehe Anhang Tab. 45 und 46). Zu diesem Zeitpunkt konnten die Imbrex-Versuchsglieder auf Grund starken Befalls mit *P. striiformis* nicht mehr bonitiert werden. Die vorgesehene Fungizidapplikation zu BBCH 49 wurde ebenfalls wegen des starken Befalls mit *P. striiformis* nicht durchgeführt. Für diese Versuchsglieder liegen deshalb keine Daten vor.

Ebenso wie die Daten von Z. tritici, konnten auch die Bonituren von P. triticina der nicht überdachten Varianten des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer 2013 statistisch nicht analysiert werden (Daten siehe Anhang Tab. 43). Die Bonitur der nicht überdachten Varianten musste eine Woche früher als in den überdachten Varianten beendet werden, weil die Pflanzen bereits abgestorben waren. Am 04.07.2013 lag der Befall mit P. triticina auf dem Fahnenblatt in den unbehandelten Kontrollen der Applikationstermine BBCH 32, 39 und 49 zwischen 22 und 50%, auf F-1 zwischen 42 und 65% und auf F-2 zwischen 66 und 100%. In den Fungizidvarianten war auf der zur Applikation jeweils obersten Blattetage kaum eine Befallsentwicklung festzustellen. Bei den Applikationsterminen BBCH 39 und 49 trat auf dem Fahnenblatt in keiner Fungizidvariante Befall auf. Generell war der Befall bei den Varianten ohne Dach deutlich geringer und heterogener, als bei den Pflanzen unter dem Dach. Bei den überdachten Pflanzen wurde ein guter Befall mit P. triticina erreicht (siehe Kapitel 3.4.2.2). Ohne einen Vergleich zu den nicht überdachten Versuchsgliedern ließ sich jedoch keine Aussage zum Niederschlagseinfluss treffen. Die Daten der überdachten Versuchsglieder wurden für die Berechnung der Wirkungsdauer gegen P. triticina verwendet (siehe Kapitel 3.4.2.2).

Die Wirkungsdauer für *P. triticina* im Jahr 2014 erfolgte mit Hilfe eines Blattsegmenttests im Labor (siehe Kapitel 2.1.2.3). Da die Blattsegmente jedoch bereits nach circa acht Tagen seneszent und zudem stark von Saprophyten besiedelt wurden, musste der Versuch vorzeitig beendet werden.

Auf Grund der statistisch nicht auswertbaren Versuchsergebnisse der Jahre 2013 und 2014, kann keine Aussage zur Wirkungsdauer der Fungizide in Abhängigkeit vom Niederschlag getroffen werden.

3.2 Wirkung und Wirkungsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur

Für die Berechnung des Wirkungsgrades (Gleichung 2.4) in Abhängigkeit von der Temperatur wurden die Ergebnisse des Myzelwachstumstests mit *Z. tritici* in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration herangezogen (siehe Kapitel 2.2.1). Die Regressionskoeffizienten der Anpassungen der Wirkungsgrade der untersuchten Fungizide Epoxion, Imbrex und der Fungizidmischung Epoxion+Imbrex sind in Tabelle 20 aufgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass es abhängig von der Temperatur Unterschiede bei den Wirkungsgraden der jeweiligen Fungizide gegen *Z. tritici* gab. Bei allen untersuchten Varianten wurden die höchsten Wirkungsgrade bei 15°C und die niedrigsten bei 25°C erreicht (Abb. 3.2). Für

Tabelle 20: Regressionskoeffizienten für den Myzelwachstumstest in Abhängigkeit von Tempera	tur
und Konzentration mit <i>Zymoseptoria tritici</i> . SE = Standardfehler. Par. = Parameter.	

Epoxion (Epoxiconazol)										
	15°C			20°C			25°C			
Par.	Wert	SE	p-Wert	Wert	SE	p-Wert	Wert	SE	p-Wert	
a	100	135,806	<0,0001	100	1,1485	<0,0001	100	0,7707	<0,0001	
b	0,0267	22,3634	<0,0001	0,0331	0,0018	<0,0001	0,0394	0,0015	<0,0001	
x0	0,0865	65,8226	<0,0001	0,1614	0,0024	<0,0001	0,0979	0,0018	<0,0001	
R ²	0,9481			0,9274			0,9557			
Imbre	x (Fluxap	yroxad)								

	15°C			20°C			25° C		
Par.	Wert	SE	p-Wert	Wert	SE	p-Wert	Wert	SE	p-Wert
a	100	0,3518	<0,0001	100	0,8345	<0,0001	100	0,7707	<0,0001
b	0,0066	0,0003	<0,0001	0,0159	0,0009	<0,0001	0,0394	0,0015	<0,0001
x0	0,0234	0,0003	<0,0001	0,0464	0,0011	<0,0001	0,0979	0,0018	<0,0001
R ²	0,9595			0,8819			0,9473		

	15°C			20°C			25°C		
Par.	Wert	SE	p-Wert	Wert	SE	p-Wert	Wert	SE	p-Wert
a	100	0,3918	<0,0001	100	1,4997	<0,0001	100	0,9077	<0,0001
b	0,0105	0,0003	<0,0001	0,0242	0,0022	<0.,0001	0,0353	0,0014	<0,0001
x0	0,0408	0,0004	<0,0001	0,0793	0,0024	<0,0001	0,1591	0,0019	<0,0001
R ²	0,9678			0,8398			0,9667		

Imbrex beispielsweise lag der mittlere Wirkungsgrad bei einer Konzentration von 0,05 ppm Fluxapyroxad bei 15°C bei 92,6%, bei 20°C bei 59,3% und bei 25°C bei 22,6%. Um einen Wirkungsgrad von 100% bei allen Temperaturstufen zu erreichen, wurden 0,75 ppm Epoxiconazol, 0,46 ppm Fluxapyroxad und 0,5 ppm Epoxiconazol+Fluxapyroxad benötigt. Die erste Konzentration von Epoxion, die sich signifikant von der Kontrolle unterscheidet, ist 0,1 ppm Epoxiconazol bei 15°C (Tab. 21). Bei 20 und 25°C beträgt die erste signifikant unterschiedliche Konzentration 0,15 ppm. Bei Imbrex unterscheiden sich Konzentrationen größer gleich 0,075 ppm Fluxapyroxad bei allen untersuchten Temperaturen signifikant von der Kontrolle. Die durchschnittlichen Temperaturen während der Versuche sind Tabelle 22 zu entnehmen. Das Wachstum von *Z. tritici* in den Kontrollen bei den drei Temperaturstufen ist in Tabelle 23 dargestellt.

Im zweiten Myzelwachstumstest wurde der Einfluss der Temperatur (20°C) auf die Fungizide über die Zeit untersucht (siehe Kapitel 2.2.2). Hierbei konnte kein Einfluss der Temperatur auf die Fungizidwirkung festgestellt werden. Die Wirkung von Epoxion sowie von Imbrex

Tabelle 21: Niedrigste zur Kontrolle signifikant unterschiedliche Konzentrationen [ppm] der FungizideEpoxion (Epoxiconazol) und Imbrex (Fluxapyroxad) sowie einer 50:50-Mischung beiderFungizide gegen Zymoseptoria tritici (Kruskal-Wallis-Test mit Dunn post-hoc-Test).

	15°C	20°C	25°C
Epoxion	0,100	0,150	0,150
Imbrex	0,075	0,075	0,075
Epoxion + Imbrex	0,075	0,150	0,200

Tabelle 22: Durchschnittliche Messwerte für die Temperatur [°C] während der Mikrotitertests mit *Zymoseptoria tritici* (n = 7 für alle Temperaturstufen).

Temperaturstufe	Durchschnittlich Temperatur [°C		
15°C	15,8	+/- 0,9	
20°C	19,7	+/- 1,2	
25°C	25,2	+/- 0,7	

Tabelle 23: Lichtextinktion bei 405 nm von *Zymoseptoria tritici* bei verschiedenen Temperaturen in den Kontrollen (n = 56 für alle Temperaturstufen).

Temperaturstufe	Lichtextinktion
15°C	0,192
20°C	0,203
25°C	0,333





Abbildung 12: Wirkungsgrade [%] *in vitro* der Fungizide Epoxion (Epoxiconazol) und Imbrex (Fluxapyroxad) sowie einer 50:50-Mischung beider gegen *Zymoseptoria tritici*. Die Symbole stellen den Mittelwert pro Wiederholung dar, die Linien repräsentieren das Modell (Gleichung 2.5). Epoxion, Imbrex: n = 32 für alle Temperaturstufen; Epoxion+Imbrex: n = 24 für alle Temperaturstufen.

Tabelle 24: Wirkungsgrade von Epoxion (Epoxiconazol) und Imbrex (Fluxapyroxad) gegen Zymoseptoria tritici nach verschiedenen Lagerungszeiten der Fungizidsuspensionen (ohne Sporensuspension) bei 20°C. Bei der Negativkontrolle handelt es sich um frisch angesetzte Fungizidsuspension zum Zeitpunkt der Sporensuspensionszugabe. UK = unbehandelte Kontrolle. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$).

Epoxion								
Lagerung [Tage]	UK	1,0 ppm		2,1 ppm		Negativkontrolle (1 ppm)		
7	А	88,8	В	83,7	В	89,0	В	
13	А	84,7	В	84,2	В	85,0	В	
21	А	97,5	AB	98,7	BC	100,0	С	
37	А	100	В	100,0	В	100,0	С	
]	mbrex				
Lagerung	UK	1,0 pj	pm	2,1 pj	om	Negativkontrolle	(1 ppm)	
[Tage]								
7	А	94,9	В	97,3	В	94,0	В	
13	А	89,0	AB	94,5	В	88,2	В	
21	А	100,0	В	100,0	В	100,0	С	
37	А	100,0	В	100,0	В	100,0	В	

unterschieden sich bei den beiden getesteten Konzentrationen 1,0 und 2,1 ppm auch nach 37 Tagen signifikant von der Kontrolle, wobei Wirkungsgrade von 85-100% erreicht wurden (Tab. 24). Zwischen der Negativkontrolle (frisch angesetzte Fungizidsuspension) und den Fungizidkonzentrationen besteht ebenfalls kein signifikanter Unterschied.

3.3 Halbwertszeiten der Fungizide

Die Analyse der Wirkstoffgehalte in den Blättern wurde für den Parzellenversuch in Münstermaifeld im Jahr 2013 durchgeführt. Die gemessenen absoluten Wirkstoffmengen und der Verlauf des Abbaus der Fungizide sind in Abbildung 13 dargestellt. Der Messwert von Bravo direkt nach der Applikation betrug 2,1 mg Chlorthalonil/kg Frischmasse. Da der zweite Messwert neun Tage nach der Applikation bei 42,8 mg Chlorthalonil/kg Frischmasse lag und auch der dritte Messwert 16 Tage nach der Applikation höher ist als der Ausgangswert, wird der erste Messwert als Ausreißer betrachtet und in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Die Berechnung der Halbwertszeit für Chlorthalonil wurde aus diesem Grund mit Messwert zwei (neun Tage nach Applikation) als Ausgangsmenge durchgeführt. Bei der Anpassung der Messwerte mittels Exponentialfunktion (Gleichung 2.3) wurde der Wert für den Applikationstermin mathematisch geschätzt.
Für Chlorthalonil wurde eine Halbwertszeit von 5,8 Tagen berechnet. Für Epoxiconazol liegt die berechnete Halbwertszeit bei 12,1 Tagen und für Fluxapyroxad bei 8,0 Tagen. Die Halbwertszeiten für die in der Fungizidmischung enthaltenen halben Aufwandmengen der Fungizide Epoxion (0,5 l/ha) und Imbrex (1,0 l/ha) sind geringer als bei den Versuchsgliedern mit voller Aufwandmenge. Die Halbwertszeit für Epoxiconazol in der Fungizidmischung beträgt 11,9 Tage, die von Fluxapyroxad 5,0 Tage.



Abbildung 13: Wirkstoffmengen [mg/kg Frischmasse] der Fungizide in Abhängigkeit von der Zeit [Tage nach Applikation] für die Blattetage F-1 des Parzellenversuchs am Standort Münstermaifeld 2013. Die Linien repräsentieren das Modell (Gleichung 2.3), die Symbole stellen die Messwerte der Rückstandsanalysen dar.

3.4 Charakterisierung des Modells OPTIFUNG

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Modells OPTIFUNG zur Prognose der Wirkungsdauer von Fungiziden beschrieben.

3.4.1 Infektionswahrscheinlichkeit von Zymoseptoria tritici

Für die Berechnung der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* wurden Literaturdaten herangezogen (siehe Kapitel 2.4.1). In Tabelle 25 sind die absolute und die relativierte Anzahl der Läsionen in Abhängigkeit von der Blattnässeperiode und der Temperatur dargestellt.

Tabelle 25: Anzahl der Läsionen von *Zymoseptoria tritici* in Abhängigkeit von der Blattnässeperiode [Std] (links) und der Temperatur [°C] (rechts) (Magboul et al., 1992) sowie die dazugehörigen relativierten Werte.

Blattnässe- periode [Std]	Anzahl Läsionen	Anzahl Läsionen relativiert	Temperatur [°C]	Anzahl Läsionen	Anzahl Läsionen relativiert
0	0	0,00	10	1	0,05
15	2	0,09	15	15	0,71
24	3	0,14	20	21	1,00
48	5,5	0,26	25	5	0,24
72	16	0,76			
96	21	1,00			

Die mit der Beta-Hau-Funktion (Gleichung 2.8) geschätzten Regressionskoeffizienten für den Einfluss der Temperatur auf die Anzahl der Läsionen sind in Tabelle 26 aufgeführt. Die geschätzten Regressionskoeffizienten der logistischen Regression (Gleichung 2.9) zur Anpassung der Daten für die Anzahl der Läsionen in Abhängigkeit von der Blattnässeperiode sind Tabelle 27 zu entnehmen. In Abbildung 14 sind die Literaturdaten sowie die angepassten Funktionen dargestellt. Eine 3D-Darstellung der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur und der Dauer der Blattnässeperiode ist in Abbildung 15 zu sehen.

Tabelle 26: Geschätzte Regressionskoeffizienten der Beta-Hau-Funktion (Gleichung 2.8) für die Infek-
tionswahrscheinlichkeit von Zymoseptoria tritici in Abhängigkeit von der Temperatur.

		($(R^2 = 0,9953)$
Parameter	Wert	Standardfehler	p -Wert
Tmin*	2	-	-
Tmax*	30	-	-
Topt	18,7750	0,2502	0,0085
n	4,6246	0,5929	0,0812

*Parameterwerte in der Beta-Hau-Funktion fix

Tabelle 27: Geschätzte Regressionskoeffizienten der logistischen Regression (Gleichung 2.9) für die Infektionswahrscheinlichkeit von *Zymoseptoria tritici* in Abhängigkeit von der Blattnässeperiode.

			$(R^2 = 0,9762)$
Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert
a	-4,322	0,747	< 0,0001
b	0.083	0.014	< 0.0001



Abbildung 14: Anzahl entstandener Läsionen nach erfolgreicher Infektion mit *Zymoseptoria tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur [°C] (links) und der Blattnässeperiode [Std] (rechts). Die Symbole stellen die Messwerte von Magboul et al. (1992) dar, die Linien repräsentieren die Modelle (Temperatur: Gleichung 2.8, Blattnässeperiode: Gleichung 2.9).



Abbildung 15: Infektionswahrscheinlichkeit von *Zymoseptoria tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur [°C] und der Blattnässeperiode [Stunden]. Berechnung mit Gleichung 2.10.

3.4.2 Protektive Wirkungsdauer

Für die Berechnung der protektiven Fungizidwirkungsdauer wurden die Daten der Parzellenversuche für die Pathogene Z. tritici und P. triticina verwendet. Der Befallsdruck mit Z. tritici und P. triticina in den Parzellenversuchen war in den drei Versuchsjahren 2012 bis 2014 sehr unterschiedlich. Der Standort Nieder-Hilbersheim im Jahr 2012 wurde von der Auswertung ausgeschlossen, da auf keiner der bonitierten Blattetagen Befall mit Z. tritici auftrat (Daten siehe Anhang Abb. 28). An den beiden Standorten Herxheim und Biedesheim trat Z. tritici erst spät in der Saison auf, was sich in sehr niedrigen Befallshäufigkeiten von 3% auf den Fahnenblättern der unbehandelten Kontrollen zu BBCH 75 widerspiegelt (Daten siehe Anhang Abb. 28). Auf F-2 lag die Befallshäufigkeit bei circa 40%. Im Jahr 2013 herrschte an allen Standorten ein hoher Befallsdruck mit Z. tritici. Zu BBCH 75 lag die Befallshäufigkeit in den unbehandelten Kontrollen auf allen Blattetagen und Standorten bei 90-100%. 2014 lag die Befallshäufigkeit zu BBCH 75 in Biedesheim auf allen Blattetagen bei ca. 70%. In Wahlbach war das Fahnenblatt in 30% der Fälle mit Z. tritici befallen, auf F-1 und F-2 lag die Befallshäufigkeit bei ca. 80% (Daten siehe Anhang Abb. 28).

Der Befallsdruck von *P. triticina* war 2013 und 2014 sehr gering (Daten siehe Anhang Abb. 28). Im Jahr 2013 trat an allen drei Standorten *P. triticina* auf. Die Befallshäufigkeit lag zu BBCH 75 in den unbehandelten Kontrollen zwischen zwei und maximal 38% auf F-1 und bei 10 bis 27% auf dem Fahnenblatt. Im darauffolgenden Jahr kam*P. triticina* an keinem der Standorte vor. Im Jahr 2012 hingegen waren an beiden auswertbaren Standorten zu BBCH 75 alle Blätter der Blattetagen F bis F-2 in den unbehandelten Kontrollen infiziert.

Eine Besonderheit im Jahr 2014 war der - im Vergleich zu vorherigen Jahren - sehr starke Befall mit *P. striiformis* an allen Standorten (Daten siehe Anhang Abb. 28). Der Versuch am Standort Herxheim wurde zu BBCH 39 vorzeitig beendet, da zu diesem Zeitpunkt bereits 90% der Blätter von F bis F-2 mit *P. striiformis* befallen waren. Um eine Ausbreitung des fortschreitenden Befalls mit *P. striiformis* an den Standorten Biedesheim und Wahlbach zu verhindern, wurden die unbehandelten Kontrollen sowie die Bravo-Varianten am 15.05.2014 zu BBCH 49 beziehungsweise 41 mit 1,0 l/ha Corbel (750 g/l Fenpropimorph) behandelt. Zu BBCH 75 lag die Befallshäufigkeit mit *P. striiformis* in Biedesheim bei ca. 90% auf dem Fahnenblatt, 70% auf F-1 und 80% auf F-2. In Wahlbach hingegen war das Fahnenblatt mit 3% Befallshäufigkeit kaum befallen. Die Befallshäufigkeit auf F-1 und F-2 lag bei 35 beziehungsweise 85%.

Für die Berechnung der Wirkungsdauer gegen Z. *tritici* und *P. triticina* wurde die in Kapitel 2.4.2.1 erläuterte Methode angewendet. Die Vorgehensweise für die Berechnung ist in Abbildung 3.4.2 in Form eines Flussdiagramms graphisch dargestellt.

3 Ergebnisse



nach: DIN 66001 (Symbole für Programmablaufpläne)

∆BH _{UK} =	Differenz der Befallshäufigkeiten [%] zwischen den Einzeltagen für die unbehandelte Kontrolle
ΔBH _F =	Differenz der Befallshäufigkeiten [%] zwischen den Einzeltagen für die Fungizidvariante
$Z\Delta_0 =$	Differenz zwischen Fungizidvariante und unbehandelter Kontrolle
t =	Zeit
FWD =	Fungizidwirkungsdauer
LTZ =	Latenzzeit

Abbildung 16: Flussdiagramm für die Berechnung der protektiven Fungizidwirkungsdauer.

3.4.2.1 Berechnete Wirkungsdauer gegen Zymoseptoria tritici

Insgesamt konnten sieben Datensätze aus den Parzellenversuchen für die Auswertung mit *Z. tritici* genutzt werden, wobei jeder Datensatz einer Blattetage eines Standortes entspricht. Eine Übersicht der für die Berechnung der protektiven Wirkungsdauer genutzten Daten ist in Tabelle 28 dargestellt. Die Regressionskoeffizienten der logistischen Regressionen sind im Anhang in Tabelle 40 zu finden. An den Standorten Bied12 und Herx12 erfolgte die Applikation drei beziehungsweise 16 Tage vor einer Infektion mit*Z. tritici*. An den weiteren fünf Standorten wurde die Fungizidapplikation drei bis sechs Tage nach einer Infektion durchgeführt. Dies entspricht einer abgelaufenen Latenzzeit von *Z. tritici* zum Zeitpunkt der Applikation von 17 bis 30% (berechnet nach der Methode in Kapitel 2.4.2.1).

Tabelle 28: Übersicht zum berechneten Infektionsdatum (Inf.) mit *Zymoseptoria tritici*, dem bonitierten Erstauftreten (EA) und dem Applikationsdatum (Appl.) sowie der Zeitspanne von der Infektion bis zur Applikation [Tage] und der abgelaufenen Latenzzeit (LTZ) zum Applikationszeitpunkt für die Blattetagen mit protektiver Applikation.

Standort	Blattetage	Inf.	EA	Appl.	Tage von Inf. bis Appl.	abgel. LTZ zu Appl. [%]	LTZ- Dauer [Tage]
Bied12	F	04.06.2012	22.06.2012	01.06.2012	-3	0	18
Herx12	F	08.06.2012	26.06.2012	23.05.2012	-16	0	18
Bied13	F	18.05.2013	11.06.2013	24.05.2013	6	25	24
Rose13	F	24.05.2013	12.06.2013	27.05.2013	3	16	19
Bied14	F-1	02.05.2014	20.05.2014	05.05.2014	3	17	18
Bied14	F	02.05.2014	20.05.2014	05.05.2014	3	17	18
Waba14	F	08.05.2014	28.05.2014	14.05.2014	6	30	20

Die berechnete Wirkungsdauer der Fungizide Bravo und Epoxion gegen Z. *tritici* ist mit 16,5 (+/- 4,7) und 16,2 (+/- 3,5) Tagen fast identisch (Tab. 29). Die Wirkung von Imbrex und Epoxion+Imbrex ist mit 22,0 (+/- 3,0) und 21,0 (+/- 3,9) Tagen ebenfalls vergleichbar. Der größte Unterschied ist zwischen Epoxion und Imbrex festzustellen, wobei Imbrex im Mittel 5,8 Tage länger wirkt als Epoxion. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Wirkungsdauern der vier Fungizide wurde nicht festgestellt.

Tabelle 29: Berechnete protektive Wirkungsdauer [Tage] der Fungizide gegen *Zymoseptoria tritici*. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$). x = Daten nicht auswertbar.

Standort	Blattetage	Bravo	Epoxion	Imbrex	Epoxion+Imbrex
Bied12	F	х	18	19	19
Herx12	F	20	20	х	Х
Bied13	F	13	12	18	15
Rose13	F	12	13	22	19
Bied14	F	21	18	24	24
Bied14	F-1	х	х	23	24
Waba14	F	х	Х	26	25
Mittelwert		16,5	16,2	22,0	21,0
Standardabweichung		4,7	3,5	3,0	3,9
Signifikanzgruppe		А	А	А	А

Im Gegensatz zur berechneten Wirkungsdauer gibt es bei der protektiven Wirkung der einzelnen Fungizide an den meisten Standorten signifikante Unterschiede. Dies wird durch die unterschiedlichen sAUDPC-Werte (Tab. 30) deutlich. Bei den Datensätzen Bied12 und Herx12 unterscheiden sich die fünf Versuchsglieder nicht signifikant voneinander. Dies ist auf die geringen sAUDPC-Werte (0,18 beziehungsweise 0,34) beziehungsweise den geringen Befall mit *Z. tritici* der beiden Standorte zurückzuführen (siehe auch Anhang Abb. 28). Bei den übrigen Datensätzen bilden Bravo und Epoxion in allen Fällen eine Signifikanzgruppe. Imbrex und Epoxion+Imbrex sind jedoch in einem Fall signifikant unterschiedlich. Imbrex unterscheidet sich in allen Datensätzen aus 2013 und 2014 signifikant von Bravo und Epoxion. Die Fungizidmischung Epoxion+Imbrex ist in drei von fünf Datensätzen aus 2013 bis 2014 signifikant von Bravo und Epoxion zu unterscheiden.

Tabelle 30: sAUDPC-Werte für *Zymoseptoria tritici* der protektiv behandelten Blattetagen. Die Varianzanalyse wurde für jeden Datensatz einzeln durchgeführt. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$). Die Vergleiche sind in der Horizontalen zu lesen.

Standort	Blattetage	Kont	trolle	В	ravo	Еро	oxion	Im	brex	Epox	ion+Imbrex
Bied12	F	0,18	А	0,12	А	0,00	А	0,00	А	0,00	А
Herx12	F	0,34	А	0,17	А	0,14	А	0,03	А	0,00	А
Bied13	F	7,69	А	4,60	В	4,68	В	2,13	D	3,01	С
Rose13	F	7,62	А	4,66	В	4,48	В	1,70	С	2,03	С
Bied14	F	1,28	А	0,86	AB	0,84	В	0,21	С	0,47	BC
Bied14	F-1	0,75	А	0,73	А	0,98	А	0,18	В	0,64	В
Waba14	F	1,02	А	0,94	AB	0,96	В	0,38	С	0,19	BC

3.4.2.2 Berechnete Wirkungsdauer gegen Puccinia triticina

Für die Berechnung der protektiven Wirkungsdauer gegen *P. triticina* wurden die Bonituren der überdachten Varianten des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer des Jahres 2013 verwendet (siehe Kapitel 2.1.4). In den unbehandelten Kontrollen lag die Befallshäufigkeit auf jeder Blattetage bei 100%. Das Erstauftreten in der unbehandelten Kontrolle der "BBCH 32-Varianten" auf F-2 war am 12.06.2013. F-2 war zum Applikationszeitpunkt die oberste Blattetage. Das Erstauftreten in den beiden Fungizidvarianten lag am 24.06.2013. Bei den "BBCH 39- und BBCH 49-Varianten" war das Erstauftreten auf dem Fahnenblatt in den unbehandelten Kontrollen am 24.06.2013. In den beiden Fungizidvarianten war das Erstauftreten am 11.07.2013, also 17 Tage später. Auf den Blattetagen F-1 und F-2 lag das Erstauftreten bei Applikationstermin 39 und 49 in den unbehandelten Kontrollen am 17.06.2013 und in den Fungizidvarianten jeweils 7 Tage später.

Die berechnete Wirkungsdauer von Epoxion gegen *P. triticina* beträgt 31,0 (+/- 10,4) Tage. Die Wirkungsdauer von Imbrex liegt bei 31,3 (+/- 9,5) Tagen. Ein signifikanter Unterschied zwischen der Wirkungsdauer der beiden Fungizide liegt nicht vor. Die sAUDPC-Werte der Versuchsglieder der verschiedenen Applikationstermine unterscheiden sich jedoch voneinander. Beim Applikationstermin BBCH 32 unterscheidet sich Epoxion signifikant von der unbehandelten Kontrolle (Abb. 17). Imbrex unterscheidet sich weder von der Kontrolle noch von Epoxion. Beim Applikationstermin BBCH 39 sind alle drei Varianten auf F und F-1 signifikant unterschiedlich. Auf F-2 konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Die Versuchsglieder des Applikationstermins zu BBCH 49 unterscheiden sich auf F und F-1 ebenfalls alle signifikant voneinander. Auf F-2 liegt ein signifikanter Unterschied zwischen der Kontrolle und Imbrex vor. Epoxion ist von keiner der beiden anderen Varianten unterscheidbar.



Abbildung 17: sAUDPC-Werte von *Puccinia triticina* der überdachten Varianten des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer 2013 auf den Blattetagen F bis F-2 (F und F-1 waren zum Applikationstermin BBCH 32 noch nicht entwickelt). Die Varianzanalyse wurde für jeden Applikationstermin und jede Blattetage einzeln durchgeführt. Verschiedene Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$).

Die für die Berechnung der protektiven Wirkungsdauer gegen *P. triticina* außerdem vorgesehenen Daten des Blattsegmenttests aus dem Jahr 2014 (siehe Kapitel 2.1.2.4) konnten nicht für die Auswertung verwendet werden. Die im Freiland genommenen und auf Wasseragar ausgelegten Blattproben wurden im Klimaschrank bereits nach acht Tagen seneszent. Außerdem wurde ein starkes Wachstum von saprophytischen Pilzen und Bakterien festgestellt. Durch die Seneszenz der Blätter und das Wachstum der Saprophyten war eine Bonitur von *P. triticina* nicht möglich. Ein weiterer Faktor war der frühe, starke Befall der beprobten Blattetage F-1 mit *P. striiformis* (siehe Kapitel 3.4.2). Der Großteil der Blätter in den Parzellen war latent mit *P. striiformis* infiziert oder wies bereits Symptome auf, was eine Probennahme in einigen Versuchsgliedern unmöglich machte.

3.4.3 Kurative Wirkung

Für die Bestimmung der kurativen Wirkung wurden ausschließlich Bonituren von *Z. tritici* ausgewertet. Aus den Parzellenversuchen (siehe Kapitel 2.1.2) wurden alle Datensätze verwendet, bei denen zum Applikationszeitpunkt noch keine Symptome sichtbar waren, der Infektionszeitpunkt von *Z. tritici* jedoch vor dem Applikationsdatum lag (siehe Kapitel 2.4.2.2).

In Tabelle 31 ist eine Übersicht zu den ausgewerteten, kurativ behandelten Blattetagen dargestellt. Die abgelaufene Latenzzeit von *Z. tritici* zum Applikationszeitpunkt lag bei den verwendeten Daten zwischen 16 und 76%. In Tagen nach der Infektion bedeutet das eine

Zeitspanne von drei bis 16 Tagen. Für das Fungizid Bravo wurde in keinem der Datensätze eine kurative Wirkung festgestellt. Die Infektionen lagen ein bis 14 Tage vor dem Applikationstermin (Tab. 31). Epoxion wies in zwei von 12 Fällen (Bied14 und Rose13) eine kurative Wirkung auf. Die Fungizide Imbrex und Epoxion+Imbrex hingegen waren bis zu einer abgelaufenen Latenzzeit von 60% kurativ wirksam. Die Effektivität der kurativen Wirksamkeit nahm jedoch mit fortschreitender Latenzzeit ab. So lag das Infektionsereignis bei Imbrex am Standort Rose13 auf dem Fahnenblatt bei 25% abgelaufener Latenzzeit 17 Tage nach der Applikation. Am gleichen Standort lag das Infektionsdatum auf F-1 bei 55% abgelaufener Latenzzeit nur fünf Tage nach der Applikation. Bei mehr als 60% abgelaufener Latenzzeit konnten die vor der Applikation gesetzten Infektionen mit keinem der Fungizide mehr gestoppt werden.

Tabelle 31: Anzahl der Tage von der Fungizidapplikation bis zum berechneten Infektionsdatum mit Zymoseptoria tritici, sortiert nach abgelaufener Latenzzeit (LTZ) [%] zum Applikationstermin. Negative Werte bedeuten keine kurative Wirkung, positive Werte bedeuten eine kurative Wirkung der Fungizide.

Standort	Blattetage	abgel. LTZ zu Appl.	Bravo	Epoxion	Imbrex	Epoxion+Imbrex
		[%]	[Infekti	ion Tage vor	· (-) bzw. na	ach (+) Applikation]
Bied13	F	15,8	-3	-3	16	16
Bied14	F-1	16,7	-3	4	23	19
Bied14	F	16,7	-3	-3	23	19
Rose13	F	25,0	-1	8	17	8
Waba14	F	44,0	-14	-11	14	22
Herx13	F	50,0	-10	-10	7	7
Rose13	F-1	55,0	-11	-11	5	5
BY13	F	60,9	-14	-7	3	3
Waba14	F-1	66,7	-14	-14	-14	-14
BY14	F-1	66,7	-14	-14	-14	-14
Herx12	F-1	70,0	-14	-14	-4	-13
Bied13	F-1	76,2	-9	-9	-16	-9

Um zu überprüfen, ob tatsächlich eine Wirkung der Fungizide vorlag und ob diese sich zwischen den Fungiziden unterscheidet, wurden die sAUDPC-Werte und die Wirkungsgrade berechnet (siehe Gleichungen 2.7 und 2.4) (Tab. 32). Die sAUPDC-Werte für Imbrex und Epoxion+Imbrex unterscheiden sich jeweils in 11 von 12 Fällen signifikant von der Kontrolle. Es ist also auch bei den Datensätzen mit mehr als 60% abgelaufener Latenzzeit ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Fungizidvarianten und der unbehandelten Kontrolle feststellbar. Die aus den sAUDPC-Werten berechneten Wirkungsgrade liegen für Imbrex im Mittel aller Standorte bei 68% und für Epoxion+Imbrex bei 63%. Eine Abnahme der Wirkungsgrade mit fortschreitendem Ablaufen der Latenzzeit ist nicht zu erkennen. Die sAUDPC-Werte von Bravo und Epoxion unterscheiden sich in drei beziehungsweise vier von

12 Fällen signifikant von der Kontrolle. Der durchschnittliche Wirkungsgrad von Bravo ist 18,1%, der von Epoxion 20,4%.

Ebenso wie bei den Ergebnissen der Parzellenversuche, wurden im Halbfreilandversuch zur Kurativwirkung von Epoxion und Imbrex (siehe Kapitel 2.1.5) Unterschiede zwischen den beiden Fungiziden deutlich. Bei der Bonitur am 12.06.2014 wies das Fahnenblatt der unbehandelten Kontrolle eine Befallshäufigkeit mit *Z. tritici* von 41% auf (Abb. 18). F-1 hatte eine Befallshäufigkeit von 22% und F-2 von 7%.

Bei Epoxion lag die Befallshäufigkeit zum Applikationstermin "0% abgelaufene Latenzzeit" bei 15%. Mit Fortschreiten der Latenzzeit nahm die Befallshäufigkeit weiter zu und lag am spätesten Applikationstermin "70% abgelaufene Latenzzeit" auf dem Fahnenblatt bei 52%. Bis auf den Applikationstermin "0% abgelaufene Latenzzeit" unterscheiden sich die Epoxion-Versuchsglieder nicht signifikant von der unbehandelten Kontrolle.

Bei den mit Imbrex behandelten Versuchsgliedern wurde zu keinem Applikationstermin und auf keiner Blattetage eine Befallshäufigkeit von 2% überschritten. Alle Imbrex-Versuchsglieder unterscheiden sich signifikant von der unbehandelten Kontrolle und von allen Epoxion-Versuschsgliedern, außer "Epoxion - 0% abgelaufene Latenzzeit".



Abbildung 18: Befallshäufigkeit mit *Zymoseptoria tritici* in der unbehandelten Kontrolle und bei Applikation der Fungizide Epoxion (Epoxiconazol) und Imbrex (Fluxapyroxad) zu verschiedenen Zeitpunkten der Latenzzeit [%]. Verschiedene Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$).

3.4.4 Gebildete Wirkungsgruppen

Um das Modell OPTIFUNG für alle auf dem Markt verfügbaren Fungizide nutzbar zu machen, wurden die in dieser Arbeit verwendeten Produkte verschiedenen Wirkungsgruppen zugeord-

Standort	Rlattetage	ahael	Konti	مالم	Rr	UAB	[Har	ivi	[m]	Ver	Enovio	n+ Imhrev
		LTZ zu Appl. [%]			5	5						
Bied13	Ы	15,8	7,7	A	4,6	в	4,7	В	2,1	D	3,0	C
Bied14	F-1	16,7	3,4	A	3,0	Α	3,1	Α	0,8	в	1,4	В
Bied14	Ч	16,7	3,9	A	2,4	AB	3,2	A	0,6	C	0,9	BC
Rose13	Ч	25,0	7,6	A	4,7	В	4,5	В	1,7	C	2,0	C
Waba14	Ĩ	44,0	4,2	A	2,9	A	2,6	A	0,8	В	0.5	В
Herx13	Ŧ	50,0	9,0	A	8,6	AB	7,6	AB	2,5	В	2,8	В
Rose13	F-1	55,0	8,1	A	7,0	AB	6,2	В	3,3	C	3,3	C
BY13	Ч	60.9	8,8	A	8,3	AB	7,6	AB	4,0	В	4,7	AB
Waba14	F-1	66,7	7,2	A	5,3	AB	7,0	A	2,6	C	3,5	BC
BY14	F-1	66,7	10,3	A	9,9	A	8,6	AB	4,7	AB	3,2	В
Herx12	F-1	70,0	3,3	A	4,1	A	3,3	A	0,7	В	1,1	В
Bied13	F-1	76,2	8,4	A	6,7	В	6,1	BC	5,1	U	5,3	С

net (siehe Tab. 19). Dafür wurden die Mittelwerte der vereinheitlichen Fungizidbewertungstabellen aller Bundesländer herangezogen. Der Mittelwert von Imbrex und Epoxion+Imbrex ist jeweils 4,0 Kreuzchen (Tab. 33). Damit sind die Fungizide eindeutig der Wirkungsgruppe "sehr gut" zuzuordnen. Der Mittelwert von Bravo ist 2,3 Kreuzchen. Bravo wurde deshalb in Wirkungsgruppe "mittel" eingeordnet. Der Mittelwert von Epoxion liegt bei 2,7 Kreuzchen und müsste nach den mathematisch korrekten Rundungsregeln auf 3,0 Kreuzchen aufgerundet werden. Da sich in den Parzellenversuchen die sAUDPC-Werte von Epoxion und Bravo bei einer protektiven Applikation jedoch nicht unterschieden (siehe Tab. 30), wurde Epoxion ebenfalls in Gruppe "mittel" eingestuft.

Tabelle 33: Einstufung der Fungizide in Wirkungsgruppen (Mittelwerte aus den vereinheitlichten Fungizidbewertungstabellen der Pflanzenschutzdienste der Länder). 0 = keine Wirkung, 1 = Nebenwirkung, 2 = mittlere Wirkung, 3 = gute Wirkung, 4 = sehr gute Wirkung.

Produkt	Aufwandmenge [l/ha]	Mittelwert	Wirkungsgruppe
Bravo 500 (Chlorthalonil)	1,0	2,3	mittel
Epoxion (Epoxiconazol)	1,0	2,7	mittel
Imbrex (Fluxapyroxad)	2,0	4,0	sehr gut
Epoxion+Imbrex	0,5 + 1,0	4,0	sehr gut

3.4.5 Modellierung der Fungizidwirkungsdauer

Die Modellierung der protektiven Wirkungsdauer basiert ausschließlich auf Daten vonZ. *tritici*. Für die Wirkungsgruppe "mittel" wurden mit dem Verfahren der binären multiplen logistischen Regression (siehe Kapitel 2.4.4) die Temperatur- und Niederschlagssumme als signifikante Parameter identifiziert (Tab. 34). Die Summen der relativen Luftfeuchte und der Globalstrahlung hingegen hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Wirkungsdauer dieser Gruppe.

Der berechnete Trennwert (siehe Kapitel 2.4.4) für die binäre multiple logistische Funktion beträgt für die Wirkungsgruppe "mittel" 0,63. Der iterativ bestimmte Trennwert wurde auf 0,3 festgelegt. Das Modell klassifiziert damit 97,3% aller Fälle korrekt. 0,3% der Fälle werden überschätzt, 2,4% unterschätzt. Mit dem berechneten Trennwert wurden 96,5% der Fälle korrekt klassifiziert, die Überschätzungen lagen bei 2,4% und die Unterschätzungen bei 1,1%.

Die binäre multiple logistische Regression für die Wirkungsgruppe "sehr gut" hat ergeben, dass die Globalstrahlungssumme keinen signifikanten Einfluss auf die Fungizidiwirkungsdauer hat. Die Modellgleichung enthält also die Parameter Temperatursumme, Niederschlagssumme und Summe der relativen Luftfeuchte (Tab. 34). Der iterativ ermittelte Trennwert für

das Modell ist 0,3. Mit diesem Wert klassifiziert das Modell 93,9% der Fälle korrekt. Die Zahl der Überschätzungen liegt bei 1,8%, die der Unterschätzungen bei 4,3%. Der berechnete Trennwert beträgt 0,52 und klassifiziert 94,7% der Fälle korrekt, die Überschätzungen lagen bei 2,2% und die Unterschätzungen bei 3,1%.

Tabelle 34: Regressionskoeffizienten der Wirkungsgruppen "mittel", "gut" und "sehr gut" für die Berechnung der Fungizidwirkungsdauer. Tsum = Temperatursumme, NNsum = Niederschlagssumme, rLsum = Summe der relativen Luftfeuchte.

Wi	irkungsgru	ppe "mittel"	
	Wert	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-19,621	5,177	0,000
Tsum	0,026	0,007	< 0,0001
NNsum	0,344	0,105	0,001
v	Virkungsgr	uppe "gut"	
	Wert	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-14,105		
Tsum	0,048		
NNsum	0,240		
rLsum			
Wir	·kungsgrup	ope "sehr gut"	
	Wert	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-8,589	1,369	< 0,0001
Tsum	0,070	0,018	< 0,0001
NNsum	0,137	0,026	< 0,0001
rLsum	-0,013	0,004	0,004

Die Bestimmheitsmaße (Pseudo-R²) von McFadden, Cox and Snell und Nagelkerke liegen für die Wirkungsgruppen "mittel" beziehungsweise "sehr gut" bei 0,676 und 0,955 (Tab. 35), was einen hohen Einfluss der Parameter auf das Modell bedeutet (siehe Kapitel 2.4.4). Die AUC-Werte betragen 0,998 für die Wirkungsgruppe "mittel" und 0,991 für die Wirkungsgruppe "sehr gut". Diese Werte bestätigen eine sehr gute Trennschärfe des Modells (siehe Kapitel 2.4.4).

Für die Wirkungsgruppe "gut" liegen keine Daten aus den Parzellenversuchen vor. Deshalb wurde die Modellfunktion "gut" aus den Funktionen der Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" gemittelt. Die Modellfunktion für die Wirkungsgruppe "gut" enthält die Parameter Temperatur und Niederschlag (Tab. 34). Die relative Luftfeuchte wird als Parameter nicht berücksichtigt, weil sie in der Funktion für Wirkungsgruppe "mittel" ebenfalls nicht vorkommt. Aus diesem Grund konnte kein Mittelwert für diesen Parameter berechnet werden.

	WG "mittel"	WG "sehr gut"
Anzahl der Beobachtungen	369	492
Freiheitsgrade	366	488
-2 Log(Wahrscheinlichkeit)	43,027	127,589
R ² (McFadden)	0,911	0,813
R ² (Cox and Snell)	0,699	0,676
R ² (Nagelkerke)	0,955	0,901
AUC-Wert	0,998	0,991

Tabelle 35: Bestimmtheitsmaße (Pseudo-R²) und AUC-Werte für die Wirkungsgruppen (WG) "mittel" und "sehr gut".

In Abbildung 19 sind die Mittelwerte der Summen von Temperatur, Niederschlag und relativer Luftfeuchte zum Zeitpunkt des prognostizierten Wirkungsendes für die Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" in Form von Boxplots dargestellt. Die 50%-Boxen der Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" für die Temperatur überschneiden sich zwar, die Mittelwerte unterscheiden sich jedoch. Der Mittelwert für Wirkungsgruppe "mittel" beträgt 204 Gradtage, der für Wirkungsgruppe "sehr gut" beträgt 304 Gradtage. Die Summen des Niederschlags und der relativen Luftfeuchte der Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" sind signifikant unterschiedlich. Die Mittelwerte der Summen von der Applikation bis zum berechnetem Wirkungsende liegen für Wirkungsgruppe "mittel" bei 41 mm Niederschlag und 1100% Summe der relativen Luftfeuchte. Bei Wirkungsgruppe "sehr gut" ist die Fungizidwirkungsdauer durchschnittlich nach einer Summe von 61 mm Niederschlag und 1600% Summe der relativen Luftfeuchte beendet.

B)

WG WG ,sehr gut" sehr gut" WG WG "mittel" ,mittel' + 0 100 200 300 400 500 600 0 20 40 60 80 100 120 Temperatursumme [°C] Niederschlagssumme [mm] C) WG "sehr gut" WG 0 1000 2000 3000 4000

Summe relative Luftfeuchte [%]

Abbildung 19: Boxplots für die Summen von der Applikation bis zum prognostizierten Wirkungsende der Modellparameter A) Temperatur [°C], B) Niederschlag [mm] und C) relative Luftfeuchte [%] für die Wirkungsgruppen (WG) "mittel" und "sehr gut". Verschiedene Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (Tukey-Test, α = 0,05).

3.4.6 Verknüpfung des Modells OPTIFUNG mit bestehenden Modellen

Das entwickelte Modell OPTIFUNG zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer wird mit den beiden Modellen SIMONTO und SEPTRI verknüpft (Abb. 20). SIMONTO ist ein Modell zur Simulation der Entwicklungsstadien von Winterweizen (Rossberg et al., 2005). Mit SIMONTO wird bei Fungizidapplikationen vor BBCH 39 (Ligula-Stadium) - es waren zum Applikationszeitpunkt noch nicht alle Blätter vollentwickelt - überprüft ob neue Blattetagen erschienen sind. Ist dies der Fall, wird mit SEPTRI wiederum überprüft, ob ein Infektionsereignis auf der ungeschützten Blattetage prognostiziert wird. Falls ja, wird eine Folgeapplikation empfohlen.

Das Modell SEPTRI prognostiziert Infektionsereignisse von Z. tritici auf den einzelnen Blattetagen von Winterweizen (Erven, 2011). Prognostiziert SEPTRI auf einer der ertragsrelevanten Blattetagen F bis F-2 ein Infektionsereignis, wird eine Fungizidapplikation empfohlen. Mit dem Modell OPTIFUNG wird dann die Wirkungsdauer des verwendeten Fungizids berechnet. SEPTRI überprüft ab dem Zeitpunkt des prognostizierten Wirkungsendes, ob Infektionsereignisse von Z. tritici prognostiziert werden. Ist dies der Fall, wird eine Folgeapplikation empfohlen.

Es gibt also zwei Möglichkeiten für die Empfehlung einer Folgeapplikation: 1. wenn das Ende der Fungizidwirkungsdauer prognostiziert wird oder 2. wenn ein Infektionsereignis auf ungeschütztem Neuzuwachs prognostiziert wird. So kann zu einem günstigen Zeitpunkt eine Folgeapplikation durchgeführt werden, um alle Blattetagen effektiv zu schützen. Die Prognose der Wirkungsdauer auf den älteren Blattetagen wird dann von Neuem gestartet.

3.5 Validierung des Modells OPTIFUNG

Die für die Validierung des Modells OPTIFUNG vorgesehenen Versuche konnten statistisch nicht analysiert werden. Einige Versuche sind auf Grund zu geringer Befallshäufigkeiten von *Z. tritici* oder zu hohem Befallsdruck mit anderen Pathogenen wie *P. striiformis* nicht auswertbar. Bei anderen Versuchen ist das Boniturintervall für eine Validierung der prognostizierten Fungizidwirkungsdauer zu lang oder es liegen keine durchgehenden Bonituren einzelner Blattetagen vor. Aus diesem Grund wurden alternative Methoden zur Validierung einzelner Teile des Modells angewendet.

3.5.1 Berechnete Wirkungsdauer

Infektionswahrscheinlichkeit. Mit Hilfe der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* (siehe Kapitel 2.4.1) wurde für jeden Datensatz mit Hilfe des Erstauftretens überprüft, ob an dem Datum, an dem das berechnete Ende der Wirkungsdauer des jeweiligen Fungizids lag, eine Infektion mit *Z. tritici* möglich war (Tab. 36). Dann wurde die Abweichung in Tagen zwischen dem Datum des berechneten Wirkungsendes und dem Datum einer möglichen Infektion berechnet.

Die Überprüfung der Ergebnisse für die berechnete Wirkungsdauer mit Hilfe der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* (siehe Kapitel 2.4.5.1) hat ergeben, dass in 59% der Fälle die Wirkungsdauer korrekt berechnet wurde (Abb. 21). In 41% der Fälle lag das berechnete



Abbildung 20: Flussdiagramm zur Integration des Modells OPTIFUNG in die bereits bestehenden Modelle SEPTRI und SIMONTO.

Wirkungsende mehr als einen Tag nach dem Infektionsdatum. In diesen Fällen wurde die Wirkungsdauer überschätzt.



Abbildung 21: Anteil korrekter, überschätzter und unterschätzter Fälle [%] bei der Berechnung der protektiven Wirkungsdauer unter Berücksichtigung der Infektionswahrscheinlichkeit von *Zymoseptoria tritici* (n = 22).

Blattanalysen. Die Analyse der Wirkstoffgehalte in den Blättern des Parzellenversuchs Münstermaifeld 2013 (siehe Kapitel 2.1.2.2) hat ergeben, dass nach dem Ende der berechneten Wirkungsdauer (siehe Kapitel 2.4.2) von der Wirkstoffmenge bei Bravo noch 22% der Ausgangsmenge des Wirkstoffs in den Blattproben vorhanden war (Tab. 37). Bei Epoxion, dem Fungizid mit der längsten Halbwertszeit, waren am Ende der Wirkungsdauer bei der Soloapplikation noch 44,3% und bei der Applikation als Mischung zusammen mit Imbrex noch 31,3% der ursprünglichen Wirkstoffmenge vorhanden. Bei Imbrex wurden nach dem Ende der berechneten Wirkungsdauer die prozentual geringsten Wirkstoffmengen nachgewiesen. Bei der Soloapplikation waren nach 22 Tagen Wirkungsdauer noch 8,2% der Ausgangsmenge des Wirkstoffs vorhanden, bei der Mischung mit Epoxion noch 3,2%.

In Tabelle 38 sind die Wirkstoffmengen dargestellt, die zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes im Freiland ermittelt wurden. Verglichen wurden diese mit den Wirkstoffmengen, die in den Mikrotitertests benötigt wurden, um einen Wirkungsgrad von 99,9% bei einer Durchschnittstemperatur von 15°C zu erreichen (siehe Kapitel 2.4.5.1). Bei Epoxion als Solo-Applikation zum Beispiel wurden zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes noch 1,77 ppm Epoxiconazol in den Blättern festgestellt. Im Mikrotitertest wurden für einen Wirkungsgrad von 99,9% 0,28 ppm benötigt. Die im Freiland festgestellte Wirkstoffmenge ist um Faktor 6,32 höher als die in den Mikrotitertests benötigte Menge. Bei Epoxion als Mischung mit Imbrex lag der Faktor bei 8,3. Die Wirkstoffmenge von Imbrex in den Blättern war zum berechneten Wirkungsende um ein 9,3-faches höher als für 99,9% Wirkung

Table 36: Überprüfung der berechneten Wirkungsdauer anhand von erfolgreichen Infektionen mit Hilfe des Erstauftretens von *Zymoseptoria tritici*. Verglichen wurde das Datum des berechneten Endes der Wirkungsdauer mit dem anhand der Infektionswahrscheinlichkeit (Inf_W) (berechnet mit Gleichung 2.10) überprüften Infektionsdatum. Die Abweichung zwischen den Ereignissen ist in Tagen angegeben. x = Daten nicht auswertbar. Blattetage F für alle Einträge, außer F-1 für *.

Standort	Fungizid	Berechnetes Wirkungsende	Erstauftreten	Berechnetes Datum Infektion	Datum Infektion überprüft	Abweichung [Tage]
					mit Inf_W	
	Bravo	08.06.2012	26.06.2012	09.06.2012	08.06.2012	0
Hory 17	Epoxion	08.06.2012	26.06.2012	09.06.2012	08.06.2012	0
nerx12	Imbrex	Х				
	Epoxion+Imbrex	Х				
	Bravo	09.06.2012	22.06.2012	04.06.2012	ok	-5
Riad17	Epoxion	15.06.2012	03.07.2012	16.06.2012	ok	1
Dicu12	Imbrex	15.06.2012	03.07.2012	16.06.2012	echnetes Datum Abweichung fektion infektion [Tage] iberprüft mit Inf_W [Tage] 06.2012 08.06.2012 0 06.2012 08.06.2012 0 06.2012 0k -5 06.2012 0k 1 06.2013 0k -5 06.2013 0k -5 06.2013 10.06.2013 -1 06.2013 10.06.2013 2 06.2013 12.06.2013 -6 06.2013 12.06.2013 -3 05.2014 0k -2 05.2014 28.05.2014 1 05.2014 28.05.2014 -1 05.2014 28.05.2014 0	
	Epoxion+Imbrex	15.06.2012	03.07.2012	16.06.2012	ok	1
	Bravo	06.06.2013	18.06.2013	01.06.2013	ok	-5
Diad12	Epoxion	05.06.2013	18.06.2013	01.06.2013	ok	-4
Dieu15	Imbrex	11.06.2013	25.06.2013	13.06.2013	10.06.2013	$ \begin{array}{c} -5 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -5 \\ -4 \\ -1 \\ 2 \\ -7 \\ -8 \\ -6 \\ -3 \\ -2 \\ 1 \\ \end{array} $
	Epoxion+Imbrex	08.06.2013	25.06.2013	08.06.2013	10.06.2013	
	Bravo	08.06.2013	19.06.2013		ok	-7
Rose13	Epoxion	09.06.2013	19.06.2013	01.06.2013	ok	-8
KUSC15	Imbrex	18.06.2013	03.07.2012 16.06.2012 ok 1 03.07.2012 16.06.2012 ok 1 18.06.2013 01.06.2013 ok -5 18.06.2013 01.06.2013 ok -4 25.06.2013 13.06.2013 10.06.2013 -1 25.06.2013 08.06.2013 10.06.2013 2 19.06.2013 08.06.2013 10.06.2013 2 19.06.2013 01.06.2013 ok -8 02.07.2013 14.06.2013 12.06.2013 -3	-6		
	Herx12Bravo08.06.2012Epoxion08.06.2012ImbrexxEpoxion+ImbrexxEpoxion+ImbrexxBravo09.06.2012Epoxion+Imbrex15.06.2012Imbrex15.06.2012Epoxion+Imbrex15.06.2012Epoxion+Imbrex15.06.2012Epoxion+Imbrex15.06.2012Epoxion+Imbrex15.06.2013Bravo06.06.2013Epoxion+Imbrex11.06.2013Epoxion+Imbrex08.06.2013Epoxion+Imbrex09.06.2013Imbrex18.06.2013Epoxion+Imbrex15.06.2013Epoxion+Imbrex15.06.2013Imbrex15.06.2013Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014Epoxion+Imbrex29.05.2014	02.07.2013	14.06.2013	12.06.2013	-3	
	Bravo	26.05.2014	11.06.2014	24.05.2014	ok	-2
Ried14	Epoxion	23.05.2014	03.06.2014	n Berechnetes Datum Datum Infektion Abweichung [Tage] $1nfektion$ infektion [Tage] $09.06.2012$ $08.06.2012$ 0 $09.06.2012$ $08.06.2012$ 0 $09.06.2012$ $08.06.2012$ 0 $04.06.2012$ $0k$ -5 $16.06.2012$ $0k$ 1 $16.06.2012$ $0k$ 1 $16.06.2012$ $0k$ 1 $16.06.2012$ $0k$ 1 $01.06.2013$ $0k$ -5 $01.06.2013$ $0k$ -4 $13.06.2013$ $10.06.2013$ -1 $08.06.2013$ $10.06.2013$ 2 $0k$ -7 $01.06.2013$ $0k$ $14.06.2013$ $12.06.2013$ -3 $24.05.2014$ $0k$ -2 $16.05.2014$ $28.05.2014$ -1 $30.05.2014$ $28.05.2014$ -1 $30.05.2014$ $28.05.2014$ 0 $24.05.2014$		
Dicult	Imbrex	29.05.2014	17.06.2014	30.05.2014	28.05.2014	Abweichung [Tage] 0 0 0 -5 1 1 1 1 1 -5 -4 -1 2 -7 -8 -6 -3 -2 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 2 2 2
	Epoxion+Imbrex	29.05.2014	rechnetes irkungsende Erstauftreten L Berechnetes Datum Infektion Datum Uberprüft mit Inf_W Abweichung [Tage] 8.06.2012 26.06.2012 09.06.2012 08.06.2012 0 8.06.2012 26.06.2012 09.06.2012 08.06.2012 0 x x x x x 9.06.2012 22.06.2012 04.06.2012 ok -5 15.06.2012 03.07.2012 16.06.2012 ok 1 15.06.2012 03.07.2012 16.06.2012 ok 1 15.06.2012 03.07.2012 16.06.2012 ok 1 15.06.2012 03.07.2012 16.06.2013 ok -5 5.06.2013 18.06.2013 01.06.2013 ok -4 1.06.2013 25.06.2013 13.06.2013 10.06.2013 2 08.06.2013 19.06.2013 01.06.2013 ok -8 1.06.2013 02.07.2013 14.06.2013 12.06.2013 -6 15.06.2013 02.07.2013 14.06.2013 12.06.2013	-1		
	Bravo	х				
Ried14 [*]	Epoxion	Х				
Dicult	Imbrex	28.05.2014	17.06.2014	30.05.2014	28.05.2014	0
	Epoxion+Imbrex	Berechnetes Erstauftreten Berechnetes Datum Infektion Iffektion Wirkungsende Datum Infektion Infektion III III III III IIII IIII IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII	-5			
	Bravo	Х				
Waha14	Epoxion	Х			Datum Infektion [Tage] Infektion überprüft mit Inf_W [Tage] 09.06.2012 08.06.2012 0 09.06.2012 08.06.2012 0 04.06.2012 ok -5 16.06.2012 ok 1 01.06.2013 ok -5 01.06.2013 ok -4 13.06.2013 10.06.2013 -1 08.06.2013 10.06.2013 2 ok -7 0 ok 01.06.2013 ok -8 14.06.2013 12.06.2013 -3 24.05.2014 ok -2 16.05.2014 28.05.2014 -1 30.05.2014 28.05.2014 -1 30.05.2014 28.05.2014 -1 30.05.2014 28.05.2014 0 24.05.201	
11a0a17	Imbrex	09.06.2014	02.07.2014	06.06.2014	11.06.2014	2
	Herx12Epoxion imbrex Epoxion+ImbrexBied12BravoBied13BravoBied14Epoxion+Imbrex Epoxion+Imbrex Epoxion+ImbrexBied14BravoBied14BiedieBied14BiedieBied14BiedieBied14BiedieBied14BiedieBied14BiedieBied14Biedie <td>08.06.2014</td> <td>02.07.2014</td> <td>06.06.2014</td> <td>11.06.2014</td> <td>3</td>	08.06.2014	02.07.2014	06.06.2014	11.06.2014	3

Tabelle 37: Absolute und prozentuale Angaben der Wirkstoffmengen [mg/kg Frischmasse (FM) beziehungsweise %] der Fungizide zum Zeitpunkt der Applikation und des berechneten Wirkungsendes.

	Wirkungsdauer	Wirkstoffmenge	bei Applikation	Wirkstoffmenge bei Wirkungsen							
	[Tage]	[mg/kg FM]	[%]	[mg/kg FM]	[%]						
Chlorthalonil	12	124,0	100	27,27	22,0						
Epoxiconazol	13	4,0	100	1,77	44,3						
Fluxapyroxad	22	7,8	100	0,64	8,2						
Epoxiconazol	19	4,0	100	1,25	31,3						
(Mischung)											
Funxapyroxad	19	5,0	100	0,16	3,2						
(Mischung)											

Tabelle 38: Berechneter Faktor zwischen den Fungizidwirkstoffmengen zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes [mg/kg Frischmasse] und den benötigten Wirkstoffmengen [ppm] der Mikrotitertests um 99,9% Wirkung gegen *Zymoseptoria tritici* bei 15°C Durchschnittstemperatur zu erreichen.

	Wirkstoffmenge bei berechnetem Wirkungsende [mg/kg Frischmasse = ppm]	Benötigte Wirkstoffmenge [ppm] für 99,9% Wirkung bei 15°C	Faktor
Epoxiconazol	1,77	0,28	6,32
Fluxapyroxad	0,64	0,07	9,28
Epoxiconazol (Mischung)	1,25	0,15	8,33
Fluxapyroxad (Mischung)	0,16	0,15	1,07

in den Mikrotitertests benötigt wurde. Bei Imbrex als Mischung mit Epoxion beträgt der Faktor 1,1.

3.5.2 Prognostizierte Wirkungsdauer

Einzelfallanalyse. Der Versuch in **Nordrhein-Westfalen** wurde am 25.05.2013 zu BBCH 39 behandelt. Bei der ersten Bonitur am 14.06.2013 wurde in der Kontrolle auf dem Fahnenblatt eine Befallsstärke mit *Z. tritici* von 0,7% festgestellt (Abb. 22). Für Versuchsglied Bravo wurde eine Befallsstärke von 0,8% bonitiert. In den Versuchsgliedern Epoxion, Imbrex und Epoxion+Imbrex war zu diesem Zeitpunkt noch kein Befall festzustellen. Da bei Bravo bereits am ersten Boniturtermin am 14.06.2013 Befall mit *Z. tritici* bonitiert wurde, muss davon ausgegangen werden, dass die betrachtete Blattetage F kurativ behandelt worden ist. Es wird jedoch auch davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt der Applikation weniger als 30% Latenzzeit abgelaufen waren, da die Bonitur 20 Tage nach Applikation lag und der Befall noch

sehr gering war. Die Blattetage F wird deshalb für Epoxion, Imbrex und Epoxion+Imbrex als protektiv behandelt betrachtet.

Die prognostizierte Wirkungsdauer der Wirkungsgruppe "mittel" (Epoxion) betrug für diesen Standort 17 Tage und war damit am 11.06.2013 beendet. Eine Neuinfektion an diesem Datum ist nach Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* wahrscheinlich (Abb. 23). Das prognostizierte Ersttauftreten war am 30.06.2013. Eine Bonitur der Blattetage F fand jedoch erst 12 Tage später statt. Am 12.07.2013 wurde in dem Epoxion-Versuchsglied eine Befallsstärke von 4,9% bonitiert. Bei solchen Befallsstärkewerten ist die Befallshäufigkeit meistens schon sehr hoch (siehe Kapitel 2.4.2). Demnach war eine Infektion 12 Tage zuvor wahrscheinlich.

Die prognostizierte Wirkungsdauer der Wirkungsgruppe "sehr gut" (Imbrex, Epoxion+Imbrex) endet nach 21 Tagen am 15.06.2013. Da am 14.06.2013 noch kein Befall in den Fungizidversuchsgliedern festgestellt wurde, kann die Wirkung zu diesem Zeitpunkt noch nicht beendet gewesen sein. Damit wird die Berechnung des Modells als korrekt bewertet. Laut der Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* ist eine Infektion am 14.06.2013 möglich gewesen. Das prognostizierte Erstauftreten war am 04.07.2013. Am nächstgelegenen Boniturtermin, dem 12.07.2013, wurde in beiden Versuchsgliedern *Z. tritici* bonitiert. Die Befallstärke bei Imbrex betrug 3,8% und die bei Epoxion+Imbrex 2,8%. Eine Infektion acht Tage zuvor kann also als wahrscheinlich eingestuft werden.

Anhand dieser Analyse kann das Modell für den Versuchsstandort in Nordrhein-Westfalen 2013 für die Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" als korrekt eingestuft werden.



Abbildung 22: Bonituren der Befallsstärke [%] von *Zymoseptoria tritici* auf dem Fahnenblatt im Validierungsversuch in Nordrhein-Westfalen 2013. X = keine Bonitur der Blattetage an diesem Termin.



Abbildung 23: Infektionswahrscheinlichkeit von Zymoseptoria tritici für den Validierungsversuch in Nordrhein-Westfalen 2013 (Gleichung 2.10).

Die Applikation des Validierungsversuchs in **Brandenburg** 2013 wurde am 16.05.2013 zu BBCH 39 durchgeführt. Zu diesem Termin wurde auf F-2 in keinem Versuchsglied Befall von *Z. tritici* bonitiert (Abb. 24), weshalb davon auszugehen ist, dass die Blattetagen F-1 und F protektiv behandelt wurden.

Die prognostizierte Wirkungsdauer für Wirkungsgruppe "mittel" (Bravo, Epoxion) endet am 29.05.2013 nach 13 Tagen. Laut Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* ist eine Neuinfektion an diesem Tag wahrscheinlich (Abb. 25). Das berechnete Erstauftreten war am 15.05.2013. Der nächstliegende Boniturtermin ist der 21.06.2013. An diesem Datum wurde in der Kontrolle auf dem Fahnenblatt eine Befallsstärke von 2,9% und auf F-1 von 17,3% bonitiert. Bei Bravo und Epoxion lag die Befallsstärke auf F bei 0,3% und auf F-1 bei 2,4 beziehungsweise 2,9%.

Laut Modell für Wirkungsgruppe "sehr gut" (Imbrex, Epoxion+Imbrex) endet die Wirkungsdauer nach 17 Tagen am 02.06.2013. An diesem Datum ist nach der berechneten Infektionswahrscheinlichkeit für *Z. tritici* eine Infektion wahrscheinlich. Das prognostizierte Erstauftreten fällt auf den 19.06.2013. Die nächstliegende Bonitur war am 21.06.2013. An diesem Termin wurde bei Imbrex eine Befallsstärke mit *Z. tritici* von 0,25% auf dem Fahnenblatt und 2,9% auf F-1 bonitiert. Bei Epoxion+Imbrex lag die Befallsstärke bei 0 und 1,2%.

Auf Grund der geringen Befallsstärken in allen Fungizidversuchsgliedern am 21.06.2013 ist es möglich, dass die Prognosen des Modells korrekt sind und die Wirkungsdauern 13 beziehungsweise 17 Tage betrugen. Da vor dem 21.06.2013 jedoch keine Bonituren der Blattetagen F und F-1 durchgeführt wurden, lässt sich diese Vermutung nicht mit Sicherheit bestätigen.



Abbildung 24: Bonituren der Befallsstärke [%] von *Zymoseptoria tritici* auf den Blattetagen F (links) und F-1 (rechts) im Validierungsversuch in Brandenburg 2013. X = keine Bonitur der Blattetage an diesem Termin.



Abbildung 25: Infektionswahrscheinlichkeit von Zymoseptoria tritici für den Validierungsversuch in Brandenburg 2013 (Gleichung 2.10).

Vergleich der Wetterparameter. Um zu überprüfen, ob die mit dem Modell OPTIFUNG berechneten Wirkungsdauern plausibel sind, wurden die Summen der Wetterparameter Temperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte zum Zeitpunkt des berechneten beziehungsweise prognostizierten Wirkungsendes verglichen.

Zwischen den Mittelwerten der Summen der Wetterparameter lagen nur kleine Unterschiede vor (Tab. 39). Bei Wirkungsgruppe "mittel" lag die Differenz zwischen den mittleren Temperatursummen für das berechnete und das prognostizierte Wirkungsende bei 32 Gradtagen. Die Differenz bei der Luftfeuchte betrug 79%. Die Niederschlagssumme war mit 41 mm für beide identisch. Bei Wirkungsgruppe "sehr gut" war die Differenz für die Temperatur- und Niederschlagssumme jeweils 9 Gradtage beziehungsweise 9 mm, bei der Summe der relativen Luftfeuchte betrug der Unterschied 39%.

Tabelle 39: Vergleich der mittleren Temperatursumme (T) [°C], Niederschlagssumme (NN) [mm] und Summe der relativen Luftfeuchte (rL) [%] zum Zeitpunkt des berechneten beziehungsweise prognostizierten Wirkungsendes für die Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut".

	Wirk	kungsgruppe "n	nittel"	Wirkungsgruppe "sehr gut"							
	∑ T [°C]	∑ NN [mm]	∑ rL [%]	∑ T [°C]	∑ NN [mm]	∑ rL [%]					
berechnetes Wirkungsende (n = 12)	235,7	41,4	1173,8	312,7	52,3	1583,3					
prognostiziertes Wirkungsende (n = 13)	203,7	41,2	1095,1	304,1	61,3	1622,2					

3.6 Darstellung des Modells OPTIFUNG in isip

Das Modell OPTIFUNG zur Berechnung der Wirkungsdauer von Getreidefungiziden soll zur Nutzung in der Praxis auf der Internetplattform www.isip.de angeboten werden. Isip steht für "Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion". Auf der isip-Plattform sind für verschiedene Kulturen Prognosemodelle zu Schaderregern und Schädlingen verfügbar (Röhrig, 2007). Wie in Kapitel 3.4.6 erläutert, soll das Modell mit den bereits bestehenden Modellen SEPTRI und SIMONTO verknüpft werden.



Abbildung 26: Screenshot der Einhabeoberfläche des Modellprototyps OPTIFUNG in der Internetplattform www.isip.de.

Als Inputparameter für OTPIFUNG werden die Schlagkoordinaten, das Aussaatdatum, die Sorte, das Applikationsdatum und das Produkt benötigt (Abb. 26). Dem ausgewählten Produkt wird mit Hilfe einer hinterlegten Liste bundeslandspezifisch die entsprechende Wirkungsgruppe zugeordnet (siehe Kapitel 2.4.3 und 3.4.4). Anhand dieser wird die richtige Funktion, mit der das Modell gerechnet wird, ermittelt. Die protektive Wirkungsdauer des Produktes wird in Form eines grünen Balkens unter der Darstellung für die Infektionsbedingungen von *Z. tritici* dargestellt (Abb. 27).

Die kurative Wirkung der Produkte wird in Form eines orangenen Balkens unter den Infektionsbedingungen dargestellt (Abb. 27). Sie wird nur angezeigt, wenn in der Fungizidbewertungstabelle eine kurative Eigenschaft des Fungizids angegeben ist. Vom Applikationsdatum wird die Latenzzeit von Z. *tritici* bis zu dem Zeitpunkt zurückgerechnet, an dem sie bereits 30% abgelaufen war. Bis zu diesem Tag wird dann der orangene Balken angezeigt. Die Annahme dabei ist, dass eine erfolgreiche Bekämpfung von Z. *tritici* mit nahezu allen Fungiziden bis 30% abgelaufene Latenzzeit möglich ist, wenn sie kurative Eigenschaften haben.

	the late the second sec											-	Sandra Greiner										
isin	2. Julia	Stands 1975	2	and a	100		-				a sin	-	-	-	Me	in ISI	P [Bitte au	iswä	hlen	~		
	ad inter	for the series	and a second			23	23		10					1.74	-	Joine	Eold	ar a Me	ine	Datan -	Logo	ut.	
wissen wie's wachst	State 1			26.3	E.a		3	1	20	1500			-	20-1	-	nenne	reiut	st + ivie	ane	Jaten	Logo	un	
	I STARTSEIT	E I WETTE	R											So	chne	elizug	riff	Bitte au	swä	nlen	~		
REGIONALES	ENTSC	HEIDUNG SH	HILFEN		INFC	DTHE	К		۷	ERSU	CHS	BERICH	ITE										
	> Entso	cheidungshi	lfen > Get	reide >	Wint	erwei	zen >	SEP	TRI	1						(?	Hilfe	昌 Dr	Jcke	n 🍐	Zu Meir	115	
etreide	Sept	oria in V	Vinter	weiz	en	- Pr	oan	os	e	SE	PTR	(11)											
Winterweizen	10.00		3 A 4			1.1.1	- 3-																
Bestandesentwicklung	Mit SEP	TRI1 könne	n Sie sch	lagspez	ifisch	h das	Ersta	uftre	ten	von S	eptor	ia tritici	bere	chnen.	Wen	n Au	sgang	sbefa	lauf	älteren	Blätter	m	
Halmbruch	Klicken	Sie dazu bit	d 30% de te auf das	s Symbo		um e	inen r	sind	n S	chlag	anzu	nandiui legen	ng er	npronie	n.								
Blattkrankheiten	ruicken	OIC GALL DI		, cymbe	° 🗌	unre	ment	icuc		cinag	anza	legen.											
Septoria tritici	0-		F				and a start																
Stickstoffdüngung	Pro	ognose des	Erstautt	etens v	on S	eptor		CI								1.0.0				- 10		and a	
Winterroggen		Individu	Jelle Einste	Rebendle		Prog	nose für de	88	СН	Sor	te E	Blattetag	e Neu	in fektion	. А		ogelaut	ene La	tenzzeit		Simulie		
Wintergerste		Weizenfeld	Aussaat	Denandi	ung v	a ston	iui uu			IR As	900	F-2	31	0.04.14	10	Stern	100%	100%	UDe	100%	17 (15	
Triticale	1	weizenneid	03.10.13	04.05.1	4	20.05	14 💵	4	7	sta	rk	F-1	3	30.04.14		00%	100%	6 100%	100%		17.0	17.05.1	
Sommergerste	Ũ	Ort: Brecht		Epoxio	n					anfä (BSA	llig 6-7)	F-0	01	8.05.14	78%		86%	94%		100%	23.05.1		
ackfrüchte		100000000000			-		_		-				1 1000		1	101111			-		1		
lais							_																
Isaaten	Inf	ektionsbedi	ngungen	von Sep	otoria	a triti	CÎ .		_													_	
artenbau	Sch	lagname	2014											Mai									
llgemeines				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18 19		
			bedingun	gen O	0	0	0	0	0	0	٠	•	0	•	0	٠	0	0	0	0	0 0		
	We	izen feld	Infektion a Blattetta	auf ge							F-0	F-0		F-0		F-0							
	Schlag Aussa	name at	Frei w Datum	vählbarer n der Aus	Schl	lagnar	ne und	näch	stg	elegen	er Ort	skern									,		
	Progno den	ose erstellt für	Simula	ationsdat	um																		
	ввсн		Progn	ostizierte	s Ent	twickl	ungsst	adiun	n de	s Best	andes												
	Sorte	Sorte Name der verwendeten Sorte																					
	Blatteta	age	Blatte	tagen de	s Get	reide	(F-0 =	Fahn	enb	latt, F-	1 = 2.	Blatt vor	ober	n, usw.)									
		ektion	Datum der Neuinfektion der Blattetage durch Sporen von Septoria tritici. Es Blattetage dargestellt											ritici. Es v	verd	en im	mer nu	r die en	sten I	nfektion	en auf je	ede	
	Neuinf		plauerage vargestellt. Abgelaufene Latenzeit zwischen Neuinfektion und Erstauftreten									en											
	Neuinf Abgela Latenz	ufene zeit	Abgel	laufene L	aten:	Lon La																	
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau	aufene zeit ertes ftreten	Abgel Progn	laufene L ostizierte	aten: er Ter	min, a	n dem	Septo	oria	tritici a	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	elit wi	urde.						
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau Wette	aufene zzeit ertes ftreten e rbasierte In	Abgel Progn	laufene L ostizierte oedingu	aten: er Ter ngen	min, a 1 und	n dem Fungi	Septo zidw	irk	tritici a ung	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	ellt wi	urde.						
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau Wette O A	aufene zzeit ertes ftreten erbasierte In außerhalb des	Abgel Progn fektionst Prognose:	laufene L ostizierte <mark>oedingu</mark> zeitraums	aten: er Ter ngen	min, a 1 und	n dem Fungi	Septo zidw	irk	tritici a ung	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	elit wi	urde.						
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau Wette O A O In	aufene izeit irtes ftreten ir tbasierte In iußerhalb des ifektionen unv	Abgel Progn fektionst Prognose: vahrschein	laufene L ostizierte Dedingu zeitraums	aten: er Ter nger	min, a n und	n dem Fungi	Septo zidw	irk	tritici a ung	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	elit wı	urde.						
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau Wette O A O In e In	aufene izeit ertes ftreten erbasierte In außerhalb des ifektionen unv ifektionen wal	Abgel Progn fektionst Prognose: vahrschein hrscheinlic	laufene L ostizierte oedingu zeitraums Ilich h	aten: er Ter nger	min, a 1 und	n dem Fungi	Septo zidw	irk	tritici a ung	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	elit wı	urde.						
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau Wette O A O In • In • In	utene zeit rtes ftreten erbasierte In ußerhalb des fektionen unv fektionen wal eine aktuellen	fektionst Progn Prognose: vahrscheinlic Daten	laufene L ostizierte oedingu zeitraums Ilich h	aten: er Ter ngen	min, a 1 und	n dem Fungi	Septo zidw	irkı	tritici a ung	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	ellt wi	urde.						
	Neuinf Abgela Latenz Simulie Erstau Wette O A O In In In K	aufene zeit rrtes ftreten außerhalb des ifektionen unv ifektionen wal eine aktuellen ehandlungsda	fektionst Progn Prognose: vahrscheinlic Daten atum	laufene L ostizierte oedingu zeitraums Ilich h	aten: er Ter nger	min, a 1 und	n dem Fungi	Septo zidw	irkı	tritici a ung	uf der	n Schlag	erstr	nals fest	gest	ellt wi	urde.						

Abbildung 27: Screenshot der Ausgabeoberfläche des Modellprototyps OPTIFUNG in der Internetplattform www.isip.de.

ZIEL dieser Arbeit war die Entwicklung eines Modells zur objektiven und dynamischen Prognose der Wirkungsdauer von Fungiziden. Zum Erreichen dieses Ziels wurden die Wirkung und die Wirkungsdauer von Fungiziden im Labor und im Freiland untersucht. Anhand der Versuchsergebnisse wurden Wettereinflüsse identifiziert, die einen Einfluss auf die Wirkungsdauer haben. Mit Hilfe dieser ermittelten Parameter erfolgte die Entwicklung des mathematischen Modells zur Prognose der Fungizidwirkungsdauer unter besonderer Berücksichtigung von Z. tritici.

4.1 Methode zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer

Mit den Daten der Parzellenversuche wurde eine Methode entwickelt, um die Wirkungsdauer von Fungiziden bei protektiver Applikation zu berechnen (siehe Kapitel 2.4.2.1). Diese Methode basiert auf der folgenden mathematischen Annahme: Wenn der Anstieg der Befallshäufigkeit in der unbehandelten Kontrolle und der Fungizidvariante gleich ist, ist die Wirkungsdauer beendet. Von diesem Zeitpunkt wird die Latenzzeit des Pathogens abgezogen, wodurch der tatsächliche Zeitpunkt des Wirkungsverlustes berechnet wird. Denn die Wirkung des Fungizids war bereits zu dem Zeitpunkt beendet, an dem die Infektion des Blattes geschah und nicht erst, wenn nach Beendigung der Latenzzeit Symptome sichtbar wurden und ein Anstieg der Befallshäufigkeit festzustellen war.

Da diese Methode von Pathogen und Fungizid unabhängig ist, kann sie ohne Schwierigkeiten auf weitere Kulturen und Pathosysteme übertragen werden. Für eine Übertragung müssen Befallsverläufe des jeweiligen Pathogens aus Freilandversuchen vorliegen.

4.2 Wirkungsdauer und Modellparameter für Zymoseptoria tritici

Protektive Wirkungsdauer

Für die Berechnungen der Fungizidwirkungsdauer mit den Befallsverfäufen von Z. *tritici* wurde die Latenzzeit und nicht die Inkubationszeit verwendet, weil in den Parzellenversuchen Läsionen erst als Z. *tritici* bonitiert wurden, wenn eindeutig Pyknidien sichtbar waren (siehe Kapitel 2.1.1). Somit basieren die Befallsverläufe, die für die Berechnungen genutzt wurden, auch auf der Latenzzeit.

Die Methode zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer wurde mit Daten von *Z. tritici* validiert. Für die Validierung wurden zwei unterschiedliche Methoden angewendet (siehe Kapitel 2.4.5.1). Mit Hilfe der berechneten Infektionswahrscheinlichkeit von *Z. tritici* (siehe Kapitel 2.4.1) wurde überprüft, ob an dem Datum, an dem das berechnete Ende der Wirkungsdauer des jeweiligen Fungizids liegt, eine Infektion möglich gewesen ist. Die Validierung ergab eine korrekte Berechnung des Wirkungsendes von 59%. Insgesamt 41% der Fälle wurden bei der Berechnungsmethode überschätzt. Unterschätzungen kamen hingegen nicht vor. Als Überbeziehungsweise Unterschätzung wurden Datensätze eingeordnet, bei denen die Abweichung größer als ein Tag war. Dieses Validierungsschema ist sehr "scharf". Bei Verwendung des üblichen Validierungsschemas, das Abweichungen von +/- 7 Tagen toleriert (Racca et al., 2011), liegt die Anzahl der korrekt berechneten Fälle bei 100%.

Mit Hilfe der Wirkstoffgehalte in den Blättern des Standortes Rose13 (siehe Kapitel 2.1.2.2) konnte gezeigt werden, dass die berechneten Wirkungsdauern realistisch sind. Zum berechneten Wirkungsende lag die gemessene Wirkstoffmenge jeden Fungizids deutlich unter der Ausgangsmenge. Die Restmengen lagen zwischen 44 und 3%. Dass bei diesen Wirkstoffmengen ein Wirkungsverlust plausibel ist, zeigt der Vergleich mit den Ergebnissen des Mikrotitertests mit *Z. tritici*. Als Vergleichswerte wurden hier die Wirkstoffmengen herangezogen, die ermittelt wurden, um bei einer Temperatur von 15°C einen Wirkungsgrad von 99,9% zu erzielen (siehe Kapitel 2.4.5.1). Die Werte des Mikrotitertests lagen um den Faktor eins bis neun unter den gemessenen Wirkstoffmengen zum berechneten Wirkungsende. Unter der Berücksichtigung, dass bei Laborwerten im Vergleich zum Freiland in den meisten Fällen niedrigere Konzentrationen benötigt werden, sind diese Faktoren als tolerabel einzustufen.

Für die Entwicklung der Methode zur Berechnung der protektiven Fungizidwirkungsdauer wurden *Z. tritici*-Befallsverläufe aus den Parzellenversuchen verwendet. Im Jahr 2012 erfolgte die Applikation der Parzellenversuche nach Überschreiten der Bekämpfungsschwelle von

Z. *tritici* (siehe Kapitel 2.1.2.1). Da die Bekämpfungsschwelle an keinem der Standorte überschritten wurde, erfolgten die Behandlungen zu BBCH 55-59. Es stellte sich jedoch heraus, dass dieser späte Applikationszeitpunkt nicht zur Bestimmung der Wirkungsdauer von Fungiziden geeignet ist. Zwischen BBCH 55-59 und dem Boniturende zu BBCH 75 lagen jeweils nur 21 Tage. Diese Zeit entspricht in etwa der Wirkungsdauer der Fungizide. Ohne mindestens einen darauffolgenden Boniturtermin konnte keine Aussage zur Wirkungsdauer getroffen werden. Hinzu kommt außerdem, dass zu BBCH 75 keine grüne Blattfläche mehr vorhanden war. Das Pathogen konnte sich deshalb nicht mehr entwickeln beziehungsweise war nicht mehr zu bonitieren.

Im Jahr 2013 wurde der Applikationszeitpunkt deshalb auf BBCH 39 festgelegt (siehe Kapitel 2.1.2.2). Zu diesem Entwicklungsstadium waren alle Blätter vollentfaltet, sodass sie dem Fungizid vollständig ausgesetzt waren und in der Auswertung berücksichtigt werden konnten. Außerdem betrug der Zeitraum bis zur Abreife der Pflanzen (BBCH 75) circa 38 Tage und reicht damit aus, um die Fungizidwirkungsdauer bewerten zu können. Im Jahr 2013 traten im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt bereits sehr früh starke Infektionen mit *Z. tritici* auf. Die meisten Blattetagen wurden deshalb zu BBCH 39 bereits kurativ behandelt. Auf Basis dieser Daten wurde mit der Entwicklung der Methode zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer begonnen. Dabei stellte sich heraus, dass nur Befallsverläufe von protektiv behandelten Blattetagen für die Methode genutzt werden können. Eine dynamische Prognose der kurativen Wirkungsdauer ist nicht sinnvoll, da das Infektionsereignis zum Zeitpunkt der Applikation in der Vergangenheit liegt. Es gilt hier nur die Frage zu beantworten, ob die Infektion gestoppt werden konnte oder nicht.

Um möglichst viele Befallsverläufe auf protektiv behandelten Blattetagen zu generieren, wurde die Fungizidapplikation im Jahr 2014 nach dem Prognosemodell SEPTRI (Erven, 2011) durchgeführt (siehe Kapitel 2.1.2.3). Wenn auf F-2 ein Infektionsereignis prognostiziert wurde, sollte spätestens bis 30% abgelaufene Latenzzeit von *Z. tritici* die Behandlung erfolgen. So sollte sichergestellt werden, dass die Blattetagen F-1 und F in jedem Fall protektiv behandelt wurden. Für den Fall, dass ein Infektionsereignis auf F-2 prognostiziert wird, bevor F-1 entfaltet ist, wurde die Applikation frühestens zu BBCH 34 durchgeführt. Dadurch wurde sichergestellt, dass mindestens eine protektiv behandelte Blattetage (F-1) mit in die Bonitur einging. 2014 traten in Rheinland-Pfalz an allen drei Standorten ungefähr zu BBCH 32 erste *Z. tritici*-Infektionen auf. Mit Erreichen von BBCH 34 setzte eine 10-tägige Wetterperiode mit häufigen Niederschlägen und starkem Wind ein. Eine Fungizidapplikation während dieses Zeitraumes war nicht möglich. Die Verzögerung durch die Wetterperiode mit optimalen Infektionsbedingungen führte dazu, dass das Fahnenblatt bereits spitzte und ebenso wie F-1 teilweise auch schon mit *Z. tritici* infiziert wurde. Aus diesem Grund konnten auch im Jahr 2014 nur wenige Daten protektiv behandelter Blattetagen erzeugt werden.

Die Erfahrung dieser drei Versuchsjahre hat gezeigt, dass die Bestimmung des Applikationszeitpunktes mit Hilfe eines Prognosemodells die beste Methode für Parzellenversuche mit diesen Zielsetzungen ist. Ein Risiko für Komplikationen besteht trotz allem, wie das Versuchsjahr 2014 gezeigt hat.

Kurative Wirkung

Die Wirkung eines Fungizids wird maßgeblich von der Zeitperiode, die von der Infektion bis zur Fungizidapplikation vergangen ist, beeinflusst (Ivic, 2010; Sanssene et al., 2011). Ein Fungizid kann gegen kleine Mengen von Myzel nahe der Pflanzenoberfläche eine gute Wirkung erzielen, wohingegen die Bekämpfung größerer Mengen schwierig sein kann (Ivic, 2010). Zum Beispiel stellten Schoefl und Zinkernagel (1997) fest, dass die Reduktion der nekrotischen Blattfläche an Weizen stark abnahm, je länger die Periode zwischen der Infektion mit Z. tritici und der Applikation verschiedener Azole war. Ceynowa et al. (1993) fanden in Freilandversuchen heraus, dass Z. tritici bis zu einer abgelaufenen Inkubationszeit von 50% erfolgreich bekämpft werden kann, sofern die Fungizide kurative Eigenschaften aufweisen. Auf diesen Ergebnissen basiert die praxisübliche Empfehlung vieler Pflanzenschutzexperten zur kurativen Wirkung von Fungiziden. Nach dieser Empfehlung ist eine Bekämpfungsmaßnahme mit Fungiziden mit kurativen Eigenschaften bis zu 30% abgelaufener Latenzzeit von Z. tritici erfolgreich. Diese Empfehlung wird gegeben, weil bei Z. tritici der Zeitpunkt "50% abgelaufene Inkubationszeit" in etwa mit dem Zeitpunkt "30% abgelaufene Latenzzeit" übereinstimmt (Erven, 2011). Um die Richtigkeit und Aktualität dieser Aussage zu überprüfen, wurde die kurative Wirkung der in dieser Arbeit verwendeten Fungizide anhand der Ergebnisse der Parzellenversuche und der Halbfreilandversuche analysiert.

Die Auswertung der Parzellenversuche (siehe Kapitel 2.1.2 und 3.4.3) hat gezeigt, dass Bravo und Epoxion keine kurative Wirkung besitzen. Bereits bei einer Applikation zu 16% abgelaufener Latenzzeit von *Z. tritici* konnten die Infektionen in den Parzellenversuchen nicht mehr gestoppt werden. Imbrex und die Fungizidmischung Epoxion+Imbrex hingegen haben eine kurative Wirkung bis circa 60% abgelaufene Latenzzeit gezeigt. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen aus dem Halbfreilandversuch zur Kurativwirkung (siehe Kapitel 2.1.5 und 3.4.3). Im Halbfreilandversuch lag die Befallshäufigkeit mit *Z. tritici* auf dem Fahnenblatt bei Imbrex auch zu 70% abgelaufener Latenzzeit bei nur 2%, im Gegensatz zu 41% in der unbehandelten Kontrolle. Epoxion zeigte im Vergleich zur Kontrolle bereits bei 20% abgelaufener Latenzzeit keine signifikante Wirkung mehr. Anhand der Ergebnisse des Halbfreilandversuchs kann vermutet werden, dass die kurative Wirkung der Fungizidmischung in den Parzellenversuchen hauptsächlich durch den Imbrex-Anteil hervorgerufen wird. Das

bedeutet, dass Imbrex wahrscheinlich auch mit der halben Feldaufwandmenge (= 1,0 l/ha) eine volle kurative Wirksamkeit aufweist.

Bei der Betrachtung des Ergebnisses des Halbfreilandversuchs für Epoxion muss berücksichtigt werden, dass der Wirkungsgrad bei 0% abgelaufener Latenzzeit, also protektiver Applikation, nur bei 46% lag. Auf den protektiv behandelten Blattetagen der Parzellenversuche lag der Wirkungsgrad für Epoxion in den Jahren 2013 und 2014 zu BBCH 75 im Schnitt bei nur 24%. Diese schwachen Wirkungsgrade und die nicht vorhandene Kurativwirkung könnten auf eine Resistenz von *Z. tritici* gegenüber Epoxiconazol hindeuten.

Von 1992 bis 2012 wurde in europäischen Monitoringstudien in Mikrotitertests ein kontinuierlicher Shift der Sensitivität von *Z. tritici* gegenüber Epoxiconazol beobachtet (Gisi et al., 2004; Leroux et al., 2004; Stammler und Semar, 2011; Cools und Fraaije, 2013). Die Wirkung im Feld wurde bisher durch diesen Shift jedoch nicht negativ beeinflusst. Leroux et al. (2004) und Stammler und Semar (2011) berichten, dass die Feldwirkung von Epoxiconazol zwischen 1997 und 2006 konstant bei circa 65% lag. Auch Cools und Fraaije (2013) berichten, dass bis 2012 keine Minderwirkung festgestellt werden konnte. Langzeitstudien in Großbritannien zeigen, dass der Wirkungsgrad von Epoxiconazol bei protektiver Applikation in den Jahren 1995 bis 2013 zwischen 85 und 70% lag (HGCA, 2013). Gleichzeitig konnte jedoch eine Abnahme der Wirkungsgrade bei kurativer Behandlung mit Epoxiconazol nachgewiesen werden. Der Wirkungsgrad ist von 95% im Jahr 1995 auf 30% in 2013 gesunken (HGCA, 2013). Trotz der immer noch guten protektiven Wirkung von Epoxiconazol scheint eine deutlich verschlechterte kurative Wirkung bestätigt. Diesen Trend zeigten auch die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche.

Modelleigenschaften

Basierend auf den in den Parzellenversuchen bonitierten Befallsverläufen in Tagen (siehe Kapitel 2.4.2) wurde die protektive Wirkungsdauer der Fungizide berechnet (siehe Kapitel 3.4.2). Mit diesen berechneten protektiven Wirkungsdauern wurde ein Modell zur Prognose der Fungizidwirkungsdauer gegen *Z. tritici* entwickelt. Eine Vielzahl abiotischer Faktoren beeinflusst die Wirkungsdauer von Fungiziden (siehe Kapitel 1.4). Um diese zu modellieren, wurden deshalb verschiedene Wetterparameter herangezogen, mit deren Hilfe die Wirkungsdauer in Tagen in eine "biologische Zeit" umgewandelt wurde (Madden et al., 2007). Dies ermöglicht eine dynamische und standortspezifische Prognose. Mit Hilfe der binären multiplen logistischen Regression, welche als Methode für die Modellierung genutzt wurde (siehe Kapitel 2.4.4), erfolgte die Untersuchung der Wetterparameter Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung. Es stellte sich heraus, dass je nach Fungizid die

Parameter Temperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte einen signifikanten Einfluss auf die Wirkungsdauer haben.

Der Einfluss der **Temperatur** wurde in dieser Arbeit mit Hilfe eines Mikrotitertests mit *Z. tritici* untersucht (siehe Kapitel 2.2.2). In diesem Versuch wurde jedoch kein direkter Einfluss der Temperatur auf die Wirkung der Fungizide Epoxion und Imbrex nachgewiesen (siehe Kapitel 3.2). Auch nach 37 Tagen Lagerung der Fungizidsuspensionen bei einer konstanten Temperatur von 20°C (= 720 Gradtage) wurde der gleiche Effekt auf das Wachstum von *Z. tritici* festgestellt, wie bei einer frisch angesetzten Fungizidsuspension. Laborversuche von Garau et al. (2002), Angioni et al. (2003a) und Garau et al. (2009) mit verschiedenen Strobilurin- und Azolwirkstoffen ergaben ebenfalls, dass kein Einfluss der Temperatur auf den Abbau der Wirkstoffe vorliegt. In den Versuchen wurden reine, in Aceton gelöste, Wirkstoffe für 24 Stunden einer Temperatur von 50°C ausgesetzt. Für den Kontaktwirkstoff Captan allerdings wiesen Angioni et al. (2003b) mit derselben Methode einen signifikanten Einfluss der Temperatur im Labor nach.

In Studien, die sich auf Freilandversuche beziehen, wird von einer verkürzten Halbwertszeit von Epoxiconazol und Chlorthalonil bei höheren Temperaturen berichtet (Bruhn und Fry, 1982; Lin et al., 2001). Bei Lin et al. (2001) wurde der Vergleich zwischen Versuchen bei Temperaturen von 26-29°C und 16-20°C gemacht. Bruhn und Fry (1982) führten Versuche bei Durchschnittstemperaturen von 14 und 26°C durch. Diese Studien berichten zum Beispiel aber auch von einer höheren Globalstrahlung in den wärmeren Phasen.

Sowohl in den Laborversuchen dieser Arbeit als auch in anderen veröffentlichten Laborstudien (Garau et al., 2002; Angioni et al., 2003a; Garau et al., 2009) konnte kein signifikanter Einfluss der Temperatur auf die Fungizidwirkung beziehungsweise Fungizidwirkungsdauer nachgewiesen werden (mit Ausnahme von Captan). Trotzdem wird vermutet, dass die Temperatur im Freiland einen Einfluss auf die Wirkungsdauer von Fungiziden hat (Bruhn und Fry, 1982; Lin et al., 2001). Bei der auf den Parzellenversuchen basierenden Modellierung der Wirkungsdauer wurde die Temperatur ebenfalls als ein Parameter mit signifikantem Einfluss identifiziert. In den Modellfunktionen wird die Temperatur deshalb in Verbindung mit den anderen Parametern als "biologische Zeit" betrachtet. Es ist also wahrscheinlich, dass die Temperatur keinen direkten Einfluss auf die untersuchten Fungizide hat und im Freiland in wärmeren Phasen andere Faktoren zu einer verringerten Wirkung beziehungsweise verkürzten Wirkungsdauer führen, wie zum Beispiel eine höhere Globalstrahlung.

Auch die schnellere Entwicklung der Pathogene bei wärmeren Temperaturen könnte eine Rolle spielen. In den Mikrotitertests wurden bei höheren Temperaturen geringere Wirkungsgrade der Fungizide festgestellt (siehe Kapitel 2.2.1 und 3.2). Bei Temperaturen von 25°C waren die Wirkungsgrade mit Epoxion, Imbrex und Epoxion+Imbrex deutlich geringer als bei 20

und 15°C. Um Wirkungsgrade von über 90% zu erzielen, waren bei 15°C die niedrigsten Wirkstoffkonzentrationen notwendig. Da ohne Pathogen kein Einfluss der Temperatur auf das Fungizid nachgewiesen werden konnte, ist zu vermuten, dass der beschriebene Effekt durch das Pathogen verursacht wird.

Die gemessenen Werte für das Wachstum in den unbehandelten Kontrollen bei 15 und 20°C unterscheiden sich nicht signifikant. Bei 25°C hingegen wurde ein um 75% höheres Wachstum von *Z. tritici* festgestellt. Möglicherweise werden die Unterschiede in den Wirkungsgraden durch stärkeres Myzelwachstum bei 25°C verursacht. Die Optimaltemperatur für die Keimung von *Z. tritici* liegt zwischen 20-25°C (Shaner und Finney, 1976). In Versuchen von Weber (1922) erreichte die Sporenkeimung in Wasser bei 22-24°C ihr Maximum. Möglicherweise hängt das stärkere Myzelwachstum auch von einer höheren Keimungsrate ab. Ivic (2010) zufolge werden mit gleichen Fungizidkonzentrationen bei geringen Mengen von Myzel höhere Wirkungsgrade erzielt als bei großen Myzelmengen. Diese Tatsache könnte die geringen Wirkungsgrade der Fungizide bei 25°C in den Mikrotitertests erklären.

Neben der Temperatursumme ist auch die **Niederschlag**ssumme ein signifikanter Parameter in den Modellfunktionen. In Freiland- und Laboruntersuchungen wurde der Einfluss von Niederschlag auf die Wirkung von Kontaktwirkstoffen wie Chlorthalonil und Vinclozolin nachgewiesen (Bruhn und Fry, 1982; Szeto et al., 1989; Elliott und Spurr, 1993). Spezielle Untersuchungen für systemische Wirkstoffe sind zu dieser Fragestellung in der aktuellen Literatur nicht verfügbar. Da jedoch auch bei systemischen Wirkstoffen eine gewisse Menge auf der Blattoberfläche bleibt, ist es möglich, dass der Niederschlag einen Einfluss auf die Wirkungsdauer hat. Nach Angaben von Edgington et al. (1980) penetrieren nur etwa 5% des Fungizids die Pflanze, die restliche Menge verbleibt auf der Oberfläche und wirkt protektiv. Zelena und Veverka (2007) untersuchten das Penetrationsvermögen unter anderem von Horizon 250 EW (250 g/l Tebuconazol) und Amistar (250 g/l Azoxystrobin). Bei Horizon penetrierten 83,0% der Wirkstoffmenge durch die Kutikula von *Bryophyllum calycinum* (Brutblatt), bei Amistar waren es 37,6%.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Halbfreilandversuche zur Untersuchung der Wirkungsdauer in Abhängigkeit vom Niederschlag durchgeführt (siehe Kapitel 2.1.4). Die Versuche konnten statistisch jedoch nicht analysiert werden, weil die Inokulation von Z. tritici zu keinem Infektionserfolg führte. Da für die Inokulation frische Sporen aus dem Freiland verwendet wurden, kann davon ausgegangen werden, dass das Inokulum infektiös war. Vermutlich waren die Inokulationen nicht erfolgreich, weil die Blattnässedauer trotz Installation einer Nebelanlage zu kurz war. Das kürzeste Schaltintervall der Nebelanlage war 30 Minuten. Das heißt, die Anlage war 30 Minuten in der Stunde ein- beziehungsweise ausgeschaltet. In diesen 30 Minuten konnten die Blätter tagsüber je nach Witterung immer wieder abtrocknen.

Shaw (1991) untersuchte den Einfluss unterschiedlich langer Trockenperioden während des Infektionsprozesses von Z. tritici. Die Studie ergab, dass die Anzahl der Läsionen von Z. tritici stark reduziert wurde, wenn 6, 12 oder 24 Stunden nach der Inokulation eine Trockenphase von 1, 6 oder 12 Stunden einsetzte. In den Untersuchungen von Shaw (1991) wurde die Blattnässedauer in allen Versuchsgliedern nur einmal für mehrere Stunden am Stück unterbrochen. In dem Halbfreilandversuch dieser Arbeit trockneten die Blätter jedoch immer wieder erneut ab. Dieses wiederholte Abtrocknen hat vermutlich einen noch negativeren Effekt auf die Ausbildung von Läsionen als eine einzelne länger anhaltende Trockenperiode.

Ein dauerhaftes Einschalten der Nebelanlage hätte zu einer Überschwemmung der Versuchsfläche geführt und war aus diesem Grund nicht möglich. Es wären dabei pro Quadratmeter 15 l Wasser pro Stunde ausgebracht worden. Im Jahr 2014 waren die Versuchspflanzen bereits vor der Inokulation stark mit *P. striiformis* infiziert. Die dadurch stark reduzierte grüne Blattfläche trug ebenfalls zu ungünstigen Bedingungen für eine künstliche Inokulation mit *Z. tritici* bei. Als Alternative zu den künstlichen Inokulationen direkt im Freiland wäre eine Durchführung wie im Halbfreilandversuch zur Kurativwirkung denkbar (siehe Kapitel 2.1.5). Dort wurden die Pflanzen zunächst unter kontrollierten Bedingungen in der Klimakammer inkubiert und nach 24 Stunden wieder ins Freiland gestellt. Der Versuch müsste dann zwar eventuell in einem kleineren Umfang durchgeführt werden, aber die Chance für eine erfolgreiche Inokulation wäre vermutlich erhöht.

Die Summe der relativen Luftfeuchte erwies sich nur für die Fungizide Imbrex und Epoxion+Imbrex als signifikanter Modellparameter. Im Gegensatz zur Temperatur- und Niederschlagssumme hat die Summe der relativen Luftfeuchte einen positiven Einfluss auf die Wirkungsdauer. Das bedeutet, je höher die Summe ist, desto länger wirkt das Fungizid. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist, dass die Transpirationsrate von Pflanzen bei niedriger Luftfeuchte erhöht ist. Da die Wirkstoffe Epoxiconazol und Fluxapyroxad beide xylemmobil sind (Saur et al., 1991; Semar et al., 2011), werden sie mit dem Transpirationsstrom in der Pflanze verteilt und möglicherweise durch die Dampfphase entlassen. Die Möglichkeit der Reduktion von Fungizidwirkstoffen über die Dampfphase wurde sowohl für Kontaktwirkstoffe als auch für systemische Wirkstoffe nachgewiesen. Die Menge verschiedener Azolwirkstoffe (Cyproconazol, Hexaconazol, Penconazol, Propiconazol, Tebuconazol) zum Beispiel, verringerte sich durch den Vorgang der Co-Destillation (Wasserdampfdestillation) signifikant (Garland et al., 1999; Angioni et al., 2003a). In diesen und anderen Experimenten (Garau et al., 2002; Angioni et al., 2003b; Garau et al., 2009) zur Co-Destillation wurden die Fungizide allerdings von einer Oberfläche verdampft. Der Wirkstoff lag also auf der Oberfläche und wurde von dem Wasserdampf mitgerissen. Ob auch im Wasser suspendierte Wirkstoffe, wie es bei systemischen Fungiziden in der Pflanze der Fall ist, durch die Dampfphase ausgeschieden werden können, ist bisher nicht bekannt.

Gegen einen positiven Einfluss der Wirkungsdauer durch hohe relative Luftfeuchten sprechen Beobachtungen von Bedos et al. (2002). Sie zeigten, dass bei hohen Luftfeuchten die Verdampfung von Pflanzenschutzmitteln auf der Pflanzenoberfläche erhöht ist. Chlorthalonil zum Beispiel ist dafür bekannt, dass es Gewächshaus-Screeningtests durch seinen hohen Anteil in der Luft kontaminiert, indem es externe Pilzstrukturen abtötet (Copping und Hewitt, 1998). Mit 7,6x10⁻⁵ Pa bei 25°C hat Chlorthalonil einen geringen Dampfdruck (BVL, 2010), was bedeutet, dass es relativ schnell in die volatile Phase geht. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die erfassten Freilandversuchsdaten einen signifikant positiven Einfluss der relativen Luftfeuchte-Summe auf die Wirkungsdauer ergeben haben. Die genauen Ursachen dafür konnten im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht geklärt werden.

Ebenso wie die Temperatur, haben auch die Wetterparameter Niederschlag und relative Luftfeuchte einen direkten Einfluss auf die Entwicklung von *Z. tritici* (siehe Kapitel 1.5.1). Durch Niederschläge und langanhaltende Nässeperioden werden Infektionen mit *Z. tritici* gefördert (Hess und Shaner, 1987; Klink, 1997). Je höher also die Niederschlagssumme in einem Zeitraum ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für eine Infektion. Und desto wahrscheinlicher ist es auch, dass die Fungizidwirkung schneller beendet ist (Elliott und Spurr, 1993; Racca und Jörg, 2007).

Für die Globalstrahlung wurde kein signifikanter Einfluss auf die Fungizidwirkungsdauer nachgewiesen. Unter Laborbedingungen wurde der Abbau durch Sonnenlicht für chemisch reine Azolwirkstoffe als Hauptmechanismus für den Abbau beschrieben (Garau et al., 2002, 2009; Angioni et al., 2003a). Wenn der reine Wirkstoff mit einer künstlichen Wachsschicht bedeckt wurde, war die Halbwertszeit der Fungizide allerdings wesentlich länger (Angioni et al., 2003a). Auch für Freilandversuche wurden Vermutungen zum Einfluss der Globalstrahlung auf die Wirkungsdauer veröffentlicht. So vermuten Lin et al. (2001) und Angioni et al. (2003a) beispielsweise, dass eine kürzere Wirkungsdauer beziehungsweise Halbwertszeit von verschiedenen Azolwirkstoffen unter anderem durch eine höhere Globalstrahlung verursacht werden könnte. Tan et al. (2013) berichten für Chlorthalonil im Gewächshaus von einer längeren Wirkungsdauer als im Freiland und vermuten ebenfalls, dass die Globalstrahlung einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkstoffabbau hat. Wie diese Studien zeigen, hat die Globalstrahlung wahrscheinlich einen Einfluss auf die Wirkungsdauer von Fungiziden. Vermutlich ist dieser für systemische Fungizide geringer als für Kontaktfungizide, da sie in die Pflanze eindringen und so durch die Kutikula vor der UV-Strahlung geschützt werden (Monadjemi et al., 2011). In der binären multiplen logistischen Regression wurde die Globalstrahlung jedoch nicht als signifikanter Parameter ermittelt.
Wirkungsgruppen

In dieser Arbeit wurden beispielhaft drei verschiedene Fungizide und eine Fungizidmischung untersucht. Die Übertragung der Wirkungsdauer von einem auf ein anderes Fungizidprodukt ist nicht möglich, da sich jedes Produkt in seinen Eigenschaften und Wirkstoffkombinationen von anderen unterscheidet. Dies trifft sogar auf Produkte zu, die aus der gleichen Wirkstoffklasse stammen oder sogar genau den gleichen Wirkstoff enthalten (Bartlett et al., 2002). Ein weiteres Problem bei der Vergleichbarkeit ist, dass kaum Produkte mit Solowirkstoffen vermarktet werden, welche dann miteinander verglichen werden könnten. Die allermeisten Fungizide enthalten Wirkstoffmischungen mit zwei bis drei verschiedenen Wirkstoffen. Häufig werden auch zwei Produkte mit jeweils mehreren Wirkstoffen zusammen als Tankmischung kombiniert. Bei solchen Mischungen liegt die Zahl der Wirkstoffe meistens zwischen drei und sechs. Diese praxisübliche Vorgehensweise ist vor allem der Resistenzproblematik gegenüber vielen Erreger geschuldet (van den Bosch et al., 2014).

Für ein allgemeingültiges Modell müsste deshalb jedes Produkt und jede Produktkombination geprüft werden. Die Durchführung dafür notwendiger Parzellenversuche, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurden oder wie sie zum Beispiel auch Hims und Cook (1991) durchführten, ist sehr zeit- und kostenintensiv. Das Risiko, dass Feldversuche fehlschlagen ist außerdem sehr hoch, da gute Infektionsbedingungen zum passenden Zeitpunkt herrschen müssen und die Epidemie sich gut weiterentwickeln muss. Zudem stellte es sich als schwierig heraus für die individuellen Versuche den jeweils passenden Applikationstermin zu finden, um möglichst viele protektiv behandelte Blattetagen zu erzeugen. Schoefl und Zinkernagel (1997) entwickelten eine Art "Schnelltestsystem" für die Ermittlung der protektiven und kurativen Fungizidwirkung. Trotz allem ist diese Methode immer noch sehr zeitaufwendig, wenn alle auf dem Markt verfügbaren Produkte getestet werden sollen. Um das Modell auf dem aktuellen Stand zu halten, müssten die Testreihen zudem kontinuierlich mit neuen Produkten fortgeführt werden. Ein weiterer Nachteil dieses "Schnelltestsystems" ist, dass es auf Gewächshausversuchen mit Weizensämlingen basiert und somit Umwelteinflüsse und Pflanzenentwicklung, wie sie im Freiland herrschen, nicht berücksichtigt werden können. Diese sind für die Dauer der Fungizidwirkung jedoch entscheidende Faktoren, wie bereits vorher diskutiert wurde.

Zur Lösung dieses Problems wurde ein Ansatz gewählt, bei dem die drei Wirkungsgruppen ,mittlere", "gute" und "sehr gute" Wirkung gebildet wurden (siehe Kapitel 2.4.3). Alle in den Fungizidbewertungstabellen der PSD bewerteten Fungizide wurden einer Wirkungsgruppe zugeordnet. In die Gruppe "mittlere" Wirkung wurden die Fungizide Bravo und Epoxion eingeordnet. Die Wirkungsgruppe "sehr gut" beinhaltet das Fungizid Imbrex sowie die Mischung Epoxion+Imbrex. Für die Wirkungsgruppe "gute" Wirkung lagen aus den

Parzellenversuchen keine Daten vor, sodass die entsprechende Funktion aus den Funktionen für die Wirkungsgruppen "mittlere" und "sehr gute" Wirkung gemittelt wurde.

Für jede dieser Gruppen wurde eine separate Funktion zur Berechnung der Wirkungsdauer entwickelt. In dem programmierten Modell muss das verwendete Produkt vom Nutzer aus einer Liste ausgewählt werden. Dieser Produktliste ist eine weitere Liste hinterlegt, in der jedem Produkt eine der drei Wirkungsgruppen zugeordnet wurde. Durch die Bildung der Wirkungsgruppen ist es möglich das Modell für alle Produkte und Produktmischungen zu nutzen, die in den Fungizidbewertungstabellen der PSD enthalten sind. Da die Tabellen jährlich aktualisiert werden, ist das Modell ebenfalls immer auf dem aktuellsten Stand. Wirkungsverluste, die zum Beispiel durch das Auftreten von Resistenzen gegenüber bestimmten Schaderregern entstehen, werden so direkt berücksichtigt. Da jeder PSD eine eigene Fungizidbewertungstabelle veröffentlicht, ist es mit dieser Modellstruktur sogar möglich das Modell mit den pflanzenschutzdienstspezifischen Empfehlungen rechnen zu lassen.

Validierung des Modells OPTIFUNG

Die Validierung des Modells OPTIFUNG erfolgte durch den Vergleich der Summen der Wetterparameter zum Zeitpunkt des berechneten und prognostizierten Wirkungsendes (siehe Kapitel 2.4.5.2). Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse des Modells als realistisch einzuschätzen sind, da die Summen zum Zeitpunkt des prognostizierten Wirkungsendes mit denen des berechneten Wirkungsendes übereinstimmen. Bei der Wirkungsgruppe "mittel" liegen die Summen von Temperatur und Niederschlag der prognostizierten Wirkungsdauer knapp unter den Werten der berechneten Wirkungsdauer. Die Modellfunktion unterschätzt die Wirkungsdauer der Fungizide also leicht. Bei der Wirkungsgruppe "sehr gut" zeigt das Modell hinsichtlich der Temperatursumme ebenfalls eine Tendenz zur Unterschätzung der Wirkungsdauer. Die Summen für den Niederschlag und die relative Luftfeuchte liegen minimal über den Summen zum Zeitpunkt des berechneten Wirkungsendes. Dies deutet auf eine leichte Überschätzung der Wirkungsdauer durch das Modell hin. Die Überschätzungen sind mit 9 mm beziehungsweise 45% jedoch so gering, dass sie zu vernachlässigen sind. Die Einzelfallanalyse hat gezeigt, dass die Berechnungen des Modells für die beiden Standorte NW13 und BB13 korrekt sind (siehe Kapitel 2.4.5.2 und 3.5.2).

In anderen veröffentlichten Studien finden sich ähnliche Angaben zur Wirkungsdauer, wie die mit dem Modell OPTIFUNG ermittelten. In Gewächshausuntersuchungen zur Wirkungsdauer von Opus (125 g/l Epoxiconazol, 1,0 l/ha) fanden Schoefl und Zinkernagel (1997) heraus, dass bei einer Applikation 330 Gradtage vor der Infektion keine Wirkung mehr gegenZ. *tritici* an Winterweizen erzielt werden konnte. 260 Gradtage vor der Infektion betrug der Wirkungsgrad

18% und bei 190 Gradtagen vorher 42%. Bei einer Ausdehnung der protektiven Wirkungsdauer von 190 auf 260 Gradtage wurde also eine Verringerung des Wirkungsgrades um mehr als 50% ermittelt. In Freilandversuchen mit Winterweizen wurde festgestellt, dass Tilt 250 EC (250 g/l Propiconazol, 0,5 l/ha) bei protektiver Applikation 60 Gradtage vor der Infektion mit *Z. tritici* einen Wirkungsgrad von 100% hat. Bei Applikation 200 Gradtage vor der Infektion lag der Wirkungsgrad nur noch bei 60-70% (Hims und Cook, 1991).

Nach den Fungizidbewertungstabellen der PSD sind Opus und Tilt - ebenso wie Bravo und Epoxion - in die Wirkungsgruppe "mittel" einzuordnen. Die Temperatursumme, bei der die Wirkungsdauer dieser Gruppe durchschnittlich endet, beträgt 204 Gradtage. Die Versuche von Hims und Cook (1991) und Schoefl und Zinkernagel (1997) erzielen damit ein mit dem Modell vergleichbares Ergebnis.

Die Validierungsversuche (siehe Kapitel 2.1.3) konnten aus verschiedenen Gründen statistisch nicht analysiert werden. In einigen Versuchen war die Befallshäufigkeit mit *Z. tritici* zu gering oder der Befallsdruck mit anderen Pathogenen wie *P. striiformis* so hoch, dass der *Z. tritici*-Befall überlagert wurde. Im Jahr 2012 zum Beispiel trat am Standort in Niedersachsen gar kein Befall mit *Z. tritici* auf. An den Standorten in Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen lag die Befallshäufigkeit in den unbehandelten Kontrollen auf dem Fahnenblatt zu BBCH 75 zwischen 0 und 2,3% und auf F-1 zwischen 0 und 6,9% (Daten nicht dargestellt). Ein starker Befallsdruck mit *P. striiformis* trat im Jahr 2014 auf. Am Standort in Niedersachsen waren die Blattetagen F-1 und F-2 in den unbehandelten Kontrollen bereits zu BBCH 37 zu 100% mit *P. striiformis* befallen (Daten nicht dargestellt). In Nordrhein-Westfalen musste der Versuch wegen starken Befalls mit *P. striiformis* vorzeitig beendet werden. Zu BBCH 39 betrug die Befallshäufigkeit dort 0% auf F, 3% auf F-1, 17% auf F-2 und 60% auf F-3 (Daten nicht dargestellt). Bei anderen Versuchen reichte die Genauigkeit der Bonituren für eine Validierung nicht aus, da beispielsweise nicht an jedem Boniturtermin die gleichen Blattetagen bonitiert wurden.

In Zukunft sollte die Applikation für weitere Validierungsversuche so terminiert werden, dass möglichst viele Blattetagen protektiv gegen *Z. tritici* behandelt werden. Die erste Bonitur muss unbedingt vor der Fungizidapplikation stattfinden, damit im Nachhinein überprüft werden kann, ob die Behandlung der zu betrachtenden Blattetagen tatsächlich protektiv war. Der Abstand zwischen den Bonituren sollte maximal eine Woche betragen. Die Wirkungsdauern in den Parzellenversuchen lagen je nach Fungizid zwischen 12 und 26 Tagen (siehe Kapitel 3.4.2). Bei einem Abstand von mehr als einer Woche zwischen den Bonituren ist eine Bewertung der Fungizidwirkungsdauer deshalb nicht möglich. Wichtig ist außerdem eine kontinuierliche Bonitur der einzelnen Blattetagen.

Berücksichtigung der kurativen Wirkung im Modell OPTIFUNG

Die kurative Wirkung der Produkte wird von dem Modell OPTIFUNG berechnet, indem die Latenzzeit von *Z. tritici* ab dem Applikationsdatum bis zu dem Zeitpunkt zurückgerechnet wird, an dem sie zu 30% abgelaufen war. Die Annahme dabei ist, dass eine erfolgreiche Bekämpfung von *Z. tritici* mit allen Fungiziden bis zu 30% abgelaufener Latenzzeit möglich ist, sofern sie kurative Eigenschaften besitzen. Diese Angabe stützt sich auf jahrelange Erfahrungen der Pflanzenschutzexperten der Offzialberatung in Deutschland (Ceynowa et al., 1993) (siehe auch Abschnitt "kurative Wirkung" in Kapitel 4.2).

Diese allgemeine Annahme konnte mit den Ergebnissen des Halbfreilandversuchs zur Kurativwirkung (siehe Kapitel 3.4.3) jedoch nicht bestätigt werden. Der Versuch hat gezeigt, dass die kurative Wirkung von Fungiziden sehr unterschiedlich sein kann. Da jeweils nur ein Azol (Epoxion) und ein Carboxamid (Imbrex) untersucht wurde, kann keine Aussage dazu gemacht werden, ob die Kurativwirkung innerhalb einer Wirkstoffgruppe vergleichbar ist. Um die produktspezifische Wirkung berechnen zu können, wären Versuche mit jedem einzelnen Produkt notwendig.

Bei der Kurativwirkung gibt es - im Gegensatz zur Protektivwirkung - keine in die Zukunft reichende Wirkungsdauer, deren Länge durch Wetterparameter beeinflusst wird. Die Kurativwirkung ist lediglich davon abhängig, ob das Fungizid die zum Zeitpunkt der Applikation bereits entwickelten Pilzstrukturen noch abtöten kann oder nicht. Aus diesem Grund wird im Modell OPTIFUNG die oben erläuterte vereinfachte "30% abgelaufene Latenzzeit-Regel" für die Berücksichtigung der kurativen Wirkung verwendet. Mit dieser Methode wird zwar stark verallgemeinert angenommen, dass die Kurativwirkung von jedem Fungizid gleich ist. Da die Latenzzeit von Z. *tritici* aber in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet wird (siehe Kapitel 2.4.2 oder Erven (2011)), ist sie dennoch dynamisch.

Vergleich mit anderen Fungizidmodellen

Bisher veröffentlichte Modelle, die Berechnungen zu Fungiziden enthalten, berücksichtigen die Fungizidwirkung meistens durch einfaches Modifizieren der zugrundeliegenden epidemiologischen Modelle. Dies wird zum Beispiel durch eine Reduktion der Infektionsrate erreicht (Milne et al., 2007; Racca und Jörg, 2007; Racca und Tschöpe, 2011; Castle und Gilligan, 2012). Damit wird vor allem die Wirkung des Fungizids auf das Pathogen modelliert. Das primäre Ziel der meisten bisher veröffentlichten Modelle ist allerdings auch nicht die Prognose der Wirkungsdauer, sondern anderer Faktoren, die von der Wirkung der Fungizide

beeinflusst werden. Die Dauer der Wirkung wird in diesen Modellen nur indirekt durch die Entwicklung des Pathogens berücksichtigt.

Das Modell von Hobbelen et al. (2011) zum Beispiel prognostiziert die Selektion resistenter Individuen durch den Einsatz von Fungiziden während der Vegetationsperiode. Die Modellierung wurde beispielhaft für Azoxystrobin und *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* an Sommergerste durchgeführt. Das Modell berücksichtigt verschiedene Aufwandmengen und eine unterschiedliche Anzahl von Behandlungsterminen. Die Selektionsrate resistenter Individuen wird als Frequenz von resistenten Stämmen nach dem letzten und vor dem ersten Applikationstermin kalkuliert. Außerdem werden das Blatt- und Pathogenwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet.

Ein anderes für Getreide konzipiertes Modell berechnet den Effekt von Fungizidapplikationen auf Ertragsverluste in Winterweizen, die durch Blattkrankheiten (*Z. tritici, P. striiformis, B. graminis, P. triticina*) verursacht werden (Milne et al., 2007). In diesem Modell werden neben einzelnen Wirkstoffen auch Wirkstoffkombinationen berücksichtigt, indem zunächst jeder Wirkstoff einzeln betrachtet und dann die Wirkung kombiniert wird. Außerdem berechnet das Modell sowohl die protektive als auch die kurative Wirkung der Fungizide. Die protektive Wirkung wird durch die Reduzierung der Anzahl erfolgreicher Infektionen modelliert und durch einen Faktor reduziert, wenn die Möglichkeit besteht, dass ältere Blätter bereits vor der Applikation infiziert wurden. Die kurative Wirkung wird durch eine Blattwachstums modelliert. Durch Kopplung des Funigzidmodells mit einem Blattwachstumsmodell und einem Schaderregermodell können die Ertragsverluste geschätzt werden. Die Halbwertszeiten und Wirkungsdauern der Fungizide wurden für die meisten Fungizide durch Experten geschätzt.

Die in den Modellen SIMCOL und CERCBET3 integrierten Fungizidmodule dienen der Optimierung der Bekämpfungsstrategie. SIMCOL wurde für die Optimierung der Bekämpfungsstrategie von *Colletotrichum lupini*, dem Hauptschaderreger der Blauen Lupine entwickelt (Racca und Tschöpe, 2011). Das Modell enthält ein Modul zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer. Dafür wird die Fungizidwirkung in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Dosis des Fungizids berechnet. Die Fungizidwirkungsdauer wird durch eine Reduktion der Fungizidwirkung über die Zeit in Abhängigkeit von der Temperatursumme berechnet. Das Fungizidmodul reduziert ab dem Applikationszeitpunkt die Krankheitseffizienz. Diese wiederum reduziert den Epidemiedruckindex. Wenn der Epidemiedruckindex den modellinternen Schwellenwert erreicht, wird eine neue Behandlung empfohlen. Das Modell CERCBET3 berechnet anhand der simulierten Befallshäufigkeit für *Cercospora beticola* an Zuckerrüben, ob die Bekämpfungsschwelle überschritten wurde und ob ein (erneuter) Fungizideinsatz erforderlich ist (Racca und Jörg, 2007). Ab dem Applikationstermin berech-

net CERCBET3 die weitere Befallsentwicklung unter Einfluss des Fungizids. Diese wird in Abhängigkeit von der Temperatur- und der Niederschlagssumme berechnet. In dem Modell sind Funktionen für vier Fungizide hinterlegt.

Ein Modell von Castle und Gilligan (2012) bildet die Entwicklung einer Epidemie in Abhängigkeit von der Fungizidwirkung ab. Dieses Modell basiert ausschließlich auf theoretischen Annahmen und ist damit von Kultur, Pathogen und Fungizid unabhängig. Berücksichtigt werden allerdings nur protektive Fungizide. In dem Modell werden der Effekt der Aufwandmenge und die Verringerung der Fungizidwirkung über die Zeit berücksichtigt. Durch Verknüpfung mit einem Ontogenesemodell kann zudem berücksichtigt werden, dass zu bestimmten Entwicklungsstadien der Pflanzen noch nicht alle Blätter geschützt wurden. Dadurch werden unterschiedliche Infektionsraten, je nachdem ob der Wirt geschützt wurde oder nicht, berechnet.

Im Vergleich zu den genannten Modellen berechnet das in dieser Arbeit entwickelte Modell OPTIFUNG die protektive Wirkungsdauer der Fungizide. Die Ausgangshypothese von OPTI-FUNG ist, dass auf den zu schützenden Blattetagen zum Applikationszeitpunkt noch keine Infektionen vorhanden waren. Die Wirkungsdauer wird in Abhängigkeit von Wetterparametern dynamisch berechnet, jedoch unabhängig vom Befallsgeschehen. In den Modellen SIMCOL und CERCBET3 wird eine Erstapplikation nach Überschreiten der Bekämpfungsschwelle für *C. lupini* oder *C. beticola* empfohlen (Racca und Jörg, 2007; Racca und Tschöpe, 2011). Eine Folgeapplikation wiederum wird nach Überschreiten der zweiten Bekämpfungsschwelle empfohlen. Damit berechnen diese, von der Epidemieentwicklung abhängigen Modelle, vor allem die kurative Wirkung der Fungizide.

Das Modell OPTIFUNG kann zudem für eine Prognose während der laufenden Vegetationsperiode eingesetzt werden. Dies ist für die Modelle von Milne et al. (2007) und Hobbelen et al. (2011) zum Beispiel nicht ohne weiteres möglich. Die Prognose von Ertragsverlusten und die Selektion resistenter Erreger ist von den Bedingungen während der gesamten Vegetationsperiode abhängig. Diese sind jedoch zum Applikationszeitpunkt noch nicht bekannt, weshalb eine dynamische Prognose nicht möglich ist.

In der Praxis existieren in Deutschland bisher zwei Modelle, die die Fungizidwirkungsdauer während der Vegetationsperiode prognostizieren. Das Fungizidmodell der Firma proPlant empfiehlt einen Applikationstermin und macht einen Mittelvorschlag in Abhängigkeit von der Situation auf dem Feld (Frahm et al., 1996; Johnen und Newe, 2005). Es bewertet die kurative, eradikative und protektive Wirkung von Fungiziden und Fungizidmischungen. Die Wirkungsdauer wird temperaturabhängig in Gradtagen mit Hilfe von Balken dargestellt. Über die Methode, mit der das Modell die Wirkungsdauer berechnet, liegen keine Veröffentlichungen vor. In dem Modell Vitimeteo ist das OiDiag-System integriert (Kast, 1997; Bleyer

und Kast, 2013). Vitimeteo berechnet Indexwerte, deren Höhe das aktuelle Risiko für *Erysiphe necator* an Gescheinen und Trauben des Weins darstellen. OiDiag berechnet aus den Mittelwerten der letzten sieben Tage einen weiteren Indexwert. Anhand dieses Wertes kann die Wirkungsdauer für das verwendete Fungizid aus einer Tabelle abgelesen werden. Die angegeben Wirkungsdauern basieren auf Versuchsergebnissen und Expertenwissen.

4.3 Wirkungsdauer und Modellparameter für *Puccinia triticina*

Für die Berechnung der Wirkungsdauer von Fungiziden gegen *P. triticina* wurden die Ergebnisse der Varianten mit Überdachung des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer des Jahres 2013 verwendet (siehe Kapitel 2.1.4 und 3.4.2.2). Die berechnete Wirkungsdauer von Epoxion betrug in diesem Versuch 31 Tage, die von Imbrex 31,3 Tage.

Die Daten der nicht überdachten Varianten des Halbfreilandversuchs 2013 konnten nicht in die Auswertung miteinbezogen werden. In diesen Varianten trat nur wenig und heterogener Befall mit *P. triticina* auf. Im Jahr 2013 wurden die Töpfe aller Varianten zu 2/3 ihrer Höhe eingegraben um das Austrocknen des Bodens in den Töpfen zu reduzieren. In den nicht überdachten Varianten waren die Pflanzen nicht nur dem Wasser der Nebelanlage, sondern auch dem Niederschlag ausgesetzt. In der Folge kam es insbesondere bei diesen Töpfen zu längeren Staunässephasen, durch welche vermutlich eine frühere Seneszenz der Pflanzen hervorgerufen wurde. Das vorzeitige Absterben war wahrscheinlich Grund für den schlechten Inokulationserfolg in den nicht überdachten Varianten, da die Inokulationen in den überdachten Versuchsgliedern erfolgreich waren (siehe Kapitel 3.4.2.2).

Die für die Berechnung der Wirkungsdauer gegen *P. triticina* vorgesehenen Daten der Blattsegmenttests aus dem Jahr 2014 (siehe Kapitel 2.1.2.4) konnten ebenfalls nicht ausgewertet werden. Dies lag vor allem an der verfrühten Seneszenz der Blattsegmente in den Petrischalen, die trotz benzimidazolhaltigem Wasseragar (100 mg/l Benzimidazol) nach circa acht Tagen auftrat. Im Gegensatz zu den Versuchen während der Saison wurden in den Vorversuchen Blätter von Pflanzen verwendet, die unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern kultiviert wurden. Diese Blattsegmente blieben in den Petrischalen 16-18 Tage lang vital und die künstliche Inokulation mit *P. triticina* zeigte gute Erfolge. In anderen Studien, in denen ebenfalls mit Wasseragar mit einem Benzimidazolgehalt von 100 mg/l und Weizenblättern aus Klimakammerkultur gearbeitet wurde, blieben die Blätter sogar 19-28 Tage (Arraiano et al., 2001) beziehungsweise 21-42 Tage (Erven, 2011) lang vital. Die verfrühte Seneszenz bei den Freilandblättern wurde vermutlich durch Saprophyten hervorgerufen. Bertelsen et al. (2001)

fanden heraus, dass durch Wachstum von saprophytischen Pilzen auf der Blattoberfläche die Seneszenz durch Abwehrreaktionen der Pflanze signifikant beschleunigt wird. Im Gegensatz zu Pflanzen, die in der Klimakammer angezogen wurden, fanden sich auf den Blättern von Freilandpflanzen Honigtau, Pollen und andere Rückstände, die saprophytischen Pilzen als Nahrung dienten. Da die Blätter vor Versuchsbeginn nicht oberflächensterilisiert werden konnten, um den Fungizidbelag nicht durch Abwaschung zu beeinträchtigen, wurden diese Rückstände vor Versuchsbeginn nicht entfernt.

Auch der Zeitpunkt der Probenahme hat wahrscheinlich einen Einfluss auf die frühe Seneszenz der Blätter. Die Proben wurden zwischen mittags und spätnachmittags genommen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Blätter - durch zum Teil hohe Temperaturen - wahrscheinlich gestresst und hatten einen niedrigeren Wassergehalt als nachts oder frühmorgens. Die Probenahme sollte deshalb am besten morgens stattfinden, wenn der Wassergehalt der Blätter am höchsten ist (Dutt und Gill, 1978).

Ein weiterer Faktor für die verfrühte Seneszenz der Freilandblätter ist wahrscheinlich die künstliche Beleuchtung in den Klimaschränken, in denen der Versuch durchgeführt wurde. Bei Pflanzen im Freiland ist die Kutikula dünner als bei Pflanzen, die in Klimakammern kultiviert werden (Bryson et al., 1995). Es könnte deshalb sein, dass die Freilandpflanzen sehr empfindlich auf das eingeschränkte Lichtangebot reagiert haben. Auf Grund der beschriebenen Schwierigkeiten scheint dieser Versuch im Labor nicht durchführbar zu sein. Eine Variante wäre die Verwendung von ausgegrabenen Freilandpflanzen. Möglicherweise ist bei ihnen die Seneszenz etwas verlangsamt, da die ganze Pflanze an sich vitaler ist als ein einzelnes Blattsegment. Es bleibt jedoch das Problem, dass die Oberfläche nicht sterilisiert werden kann.

Da für *P. triticina* nur ein Datensatz vorliegt, konnten für dieses Pathogen keine Modellfunktionen entwickelt werden.

4.4 Halbwertszeiten der Fungizide

Mit Hilfe der Analysen der Wirkstoffgehalte in den Blättern des Standortes Rose13 (siehe Kapitel 2.1.2.2 und 3.3) wurde die Halbwertszeit für die Fungizide berechnet. Auf Grund eines Analysefehlers bei dem Messwert von Chlorthalonil (als Bravo) direkt nach der Applikation, musste die Halbwertszeit mit dem zweiten Messwert als Ausgangsmenge berechnet werden. Damit stellte sich die Frage, ob die berechnete Halbwertszeit für Chlorthalonil korrekt ist. Die berechnete Halbwertszeit für Chlorthalonil von 5,8 Tagen deckt sich mit allgemeinen Angaben, die in der Literatur zu finden sind. Brenneman et al. (1990) zum Beispiel untersuchten die

Wirkstoffgehalte von Chlorthalonil an Erdnusspflanzen im Freiland. Die Halbwertszeit für das Produkt Bravo 500 lag zwischen 5,7 und 5,1 Tagen, die für Bravo 720 zwischen 4,4 und 5,9 Tagen. Ebenfalls für das Produkt Bravo 500 untersuchten Bruhn und Fry (1982) den Abbau von Chlorthalonil an Kartoffeln im Freiland. Sie berechneten eine Halbwertszeit von 6,6 Tagen. Monadjemi et al. (2011) haben für Chlorthalonil auf Pflanzen im Freiland eine Halbwertszeit von 5,3 Tagen berechnet. Es gibt jedoch auch davon abweichende Berichte über längere Halbwertszeiten von Chlorthalonil. Elliott und Spurr (1993) zum Beispiel ermittelten in Freilandversuchen mit Erdnusspflanzen eine Halbwertszeit zwischen sieben und 19 Tagen, mit einem Mittelwert von 13,6 Tagen für Bravo 720. Einen ähnlichen Wert berechneten Putnam et al. (2003) für Bravo 720 in Freilandversuchen mit Cranberries. Die Halbwertszeit für Chlorthalonil in diesen Versuchen betrug 12,1 Tage. Für Chlorthalonil (als Bravo 75 WP) an Weintrauben liegt die geschätzte Halbwertszeit zwischen 10 und 15 Tagen (Northover und Ripley, 1980).

Die Halbwertszeit von Epoxiconazol (als Epoxion) im Parzellenversuch betrug 12,1 Tage für die Soloapplikation und 11,9 Tage für die Applikation als Fungizidmischung mit halber Aufwandmenge. Diese Werte weichen von den Angaben in der verfügbaren Literatur ab. Henriet et al. (2005) stellten fest, dass die Halbwertszeit von Epoxiconazol (als Allegro) an Weizenpflanzen im Freiland 20 Tage beträgt. Lin et al. (2001) untersuchten den Abbau von Epoxiconazol (Opus SC) an Reis und stellten Halbwertszeiten von 14 bis 29 Tagen fest. Für andere Azole wurden allerdings ähnliche Halbwertszeiten wie für Epoxiconazol in dieser Arbeit berichtet. In Freilandversuchen mit Pfirsichen betrug die Halbwertszeit für Hexaconazol, Tebuconazol und Penconazol sieben Tage, für Propiconazol 14 Tage und für Cyproconazol 16 Tage (Angioni et al., 2003a).

Für die berechneten Halbwertszeiten für Fluxapyroxad (als Imbrex) von acht Tagen als Soloapplikation und fünf Tagen als Fungizidmischung stehen in der aktuellen Literatur keine Vergleichsmöglichkeiten zur Verfügung.

Epoxiconazol wies am Standort Rose13 mit 12,1 Tagen die längste Halbwertszeit auf. Mit 13 Tagen war die berechnete Wirkungsdauer von Epoxion jedoch vergleichsweise kurz. Fluxapyroxad (als Imbrex) hatte am selben Standort mit 22 Tagen die längste Wirkungsdauer, jedoch mit acht Tagen eine deutlich kürzere Halbwertszeit als Epoxiconazol. Diese Beobachtung kann anhand der Mikrotitertestergebnisse nachvollzogen werden. Von Epoxiconazol wurden 0,28 ppm benötigt um bei einer Durchschnittstemperatur von 15°C einen Wirkungsgrad von 99,9% zu erreichen. Im Vergleich dazu wurden von Fluxapyroxad nur 0,07 ppm - ein Viertel der Menge von Epoxiconazol - benötigt. Das bedeutet, Epoxiconazol baut sich zwar langsamer im beziehungsweise auf dem Blatt ab, es wird aber auch eine höhere Wirkstoffmenge benötigt, um die gleiche Wirkung wie Fluxapyroxad zu erreichen. Der Grund für die

kürzere Wirkungsdauer trotz längerer Halbwertszeit ist vermutlich, dass die ausgebrachte Wirkstoffmenge von Epoxion und Imbrex mit jeweils 125 g/ha zwar identisch war, die direkt nach der Applikation im Blatt nachweisbare Wirkstoffmenge sich jedoch deutlich unterschied. Die gemessene Wirkstoffmenge von Epoxiconazol war mit 4,0 mg/kg Frischmasse nur etwa halb so hoch wie von Fluxapyroxad mit 7,8 mg/kg Frischmasse. Für die unterschiedlich hohen Aufnahmemenge kann die Formulierung der beiden Fungizide ein Grund sein. Das Fungizid Epoxion ist als Suspensionskonzentrat formuliert, das Fungizid Imbrex hingegen als Emulsionskonzentrat. Bickers et al. (1999) und Harris (1999) zum Beispiel wiesen für die Wirkstoffe Tebuconazol und Cymoxamil beziehungsweise Fluquinconazol nach, dass die Formulierung einen signifikanten Einfluss auf die Aufnahme der Wirkstoffe in die Pflanze hat.

Die Halbwertszeit von Chlorthalonil war mit 5,8 Tagen von allen Wirkstoffen am kürzesten. Da das Fungizid Bravo nicht in den Mirktotitertests untersucht wurde, kann keine Aussage zum Wirkstoffgehalt bei 99,9% Wirkungsgrad getroffen werden. Die Ergebnisse des Standortes Rose13 zeigen anhand der Beispiele Epoxion und Imbrex jedoch, dass kein Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Wirkungsdauer der beiden Wirkstoffe besteht.

4.5 Weiterer Forschungsbedarf

Erweiterung der Datengrundlagen

Die Grundlage des Modells beruht auf wenigen Befallsverläufen von Z. tritici aus Regionen in Rheinland-Pfalz (siehe Kapitel 3.4.2). Um die Robustheit des Modells zu stärken, wäre es daher gut, die Berechnungen mit weiteren Datensätzen aus anderen Jahren und Regionen zu ergänzen. Für die Wirkungsgruppe "gut" sind bisher keine Daten vorhanden. Die Modellfunktion für diese Gruppe wurde aus denen der Wirkungsgruppen "mittel" und "sehr gut" gemittelt. Deshalb ist es empfehlenswert, diese gemittelte Funktion mit Versuchsdaten zu überprüfen.

Für *P. triticina* konnte mit den vorhandenen Daten keine Modellfunktion erarbeitet werden. Um die Datenbasis für *P. triticina* zu erweitern, sollten Parzellenversuche durchgeführt werden. Es empfiehlt sich eine künstliche Inokulation, um ein relativ frühes Auftreten des Pathogens zu erreichen. Außerdem sollten für weitere Schaderreger Daten erhoben werden, um die Nutzungsmöglichkeiten des Modells zu erweitern, zum Beispiel für *P. triticina*, *B. graminis*, *P. striiformis* oder *Pyrenophora tritici-repentis*.

Die Validierung des Modells wurde bisher nur mit zwei unabhängigen Datensätzen mittels Einzelfallanalysen durchgeführt (siehe Kapitel 3.5.2). Die weitere Validierung basiert auf abhängigen Daten (siehe Kapitel 3.5.2) und Daten aus der Literatur. Es sollten deshalb unbedingt geeignete Daten für eine Validierung erarbeitet werden, um so die Qualität des Modells zu überprüfen und genauer nachzuweisen. Durch eine Validierung mit unabhängigen Daten können Stärken und Schwächen des Modells erfasst werden. Gegebenenfalls kann mit diesen Daten auch eine Anpassung der Modellparameter durchgeführt werden.

Der Laborversuch zur Wirkungsdauer in Abhängigkeit von der Temperatur (siehe Kapitel 2.2.2) sollte wiederholt werden, um das Ergebnis zu überprüfen. In dieser Arbeit wurde der Versuch für jede Lagerungsdauer der Fungizidsuspensionen nur in einfacher Wiederholung durchgeführt.

Ergänzungsmöglichkeiten für das Modell OPTIFUNG

Einige Faktoren mit einem Einfluss auf die Wirkungsdauer von Fungiziden werden bisher nicht im Modell berücksichtigt. Diese werden im Folgenden kurz diskutiert und Lösungsansätze dargestellt.

Die Aufwandmenge hat einen Einfluss auf die Wirkung von Fungiziden. Bei einer Reduzierung um nicht mehr als 50% ist dieser bei den meisten Fungiziden allerdings nur marginal (HGCA, 2013). Einen größeren Einfluss könnten reduzierte Aufwandmengen auf die Wirkungsdauer haben. Im Moment wird für die Berechnung der Wirkungsdauer davon ausgegangen, dass die volle zugelassene Aufwandmenge verwendet wird. In der Praxis werden die Aufwandmengen vor allem aus Kostengründen jedoch häufig reduziert. Zu stark reduzierte Aufwandmengen erhöhen das Risiko für die Ausbildung von Resistenzen. Daher empfehlen die PSD in Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen beispielsweise die Aufwandmenge von Fungiziden um nicht mehr als 20% zu reduzieren (Bär et al., 2012). Es wäre deshalb eine Möglichkeit zu überprüfen, wie sich um maximal 20% reduzierte Aufwandmengen auf die Wirkungsdauer auswirken. Die andere Möglichkeit wäre, das Modell aus Gründen der Resistenzvermeidung nur mit der Berechnungsmöglichkeit für die vollen zugelassenen Aufwandmengen anzubieten.

Das **Pflanzenwachstum** hat einen indirekten Einfluss auf die Wirkungsdauer. Durch eine Zunahme der Blattfläche wird die Wirkstoffkonzentration von systemischen Wirkstoffen in der Pflanze verringert (Zongmao und Haibin, 1997; Racca und Jörg, 2007). Bei Kontaktwirkstoffen ist die neu gebildete Blattfläche ungeschützt, da sie bei der Applikation nicht mit behandelt wurde. Um den Einfluss des Pflanzenwachstums zu berücksichtigen, soll das Mo-

dell OPTIFUNG so mit den Modellen SIMONTO und SEPTRI verknüpft werden, dass eine Warnung ausgegeben wird, wenn ein Infektionsereignis des ungeschützten Neuzuwachses prognostiziert wird (siehe Kapitel 3.4.6). Nicht berücksichtigt wird jedoch der Verdünnungseffekt durch das Pflanzenwachstum. Um das Modell zu ergänzen, sollten zu diesem Aspekt Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Bedingungen zum Zeitpunkt der Applikation werden bisher ebenfalls nicht im Modell berücksichtigt. So kann ein Niederschlagsereignis kurz nach der Applikation zum Beispiel die Fungizidmenge auf und darauffolgend auch in der Pflanze reduzieren, wodurch vermutlich die Wirkungsdauer beeinträchtigt wird. Auch das Entwicklungsstadium zum Zeitpunkt der Applikation könnte eine Rolle spielen. So sind nach Currier und Dybing (1959) junge Blätter leichter für Pflanzenschutzmittel penetrierbar als Ältere. Auf Grund der unterschiedlichen Blattstellung wird vermutlich auf junge Blätter, die noch nicht vollentfaltet sind, eine geringere Fungizidmenge ausgebracht als auf Ältere, die horizontal ausgerichtet sind. Auch die Wirkstoffmenge, die in die Pflanze penetriert, könnte einen Einfluss auf die Wirkungsdauer haben, da die in der Pflanze befindliche Menge vor Umwelteinflüssen geschützt ist. Das Penetrationsvermögen von Pflanzenschutzmitteln ist stark von der Temperatur abhängig (Currier und Dybing, 1959; Buchholz, 2006). Je höher die Temperatur ist, desto besser ist die Aufnahme (Buchholz, 2006). Eine hohe relative Luftfeuchte zum Zeitpunkt der Applikation kann die Penetrationsrate erhöhen, indem sie das Trocknen des Spritzbelags verzögert, die Stomataöffnung fördert und die Permeabilität der Kutikula erhöht (Currier und Dybing, 1959).

Ein weiterer indirekter Einflussfaktor - vor allem für die Wirkungsdauer von Kontaktfungiziden - ist außerdem die **Qualität des Spritzbelages**. Die bisherige Annahme in dem Modell ist, dass ein optimaler Spritzbelag vorhanden ist. Denn je weniger ungeschützte Blattfläche vorhanden ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Infektion. An Tagen mit hohem Infektionsrisiko ist die Gefahr einer Infektion bei einem flächendeckenden Spritzbelag viel geringer als bei einem lückenhaften Spritzbelag. Es können deshalb mehr Tage mit Infektionswahrscheinlichkeit bis zum nächsten Applikationstermin abgewartet werden. Ist der Spritzbelag jedoch nicht optimal (zum Beispiel durch mangelnde Durchdringung des Weizenbestandes oder ungenügende Benetzung der Blätter), steigt das Risiko für eine Infektion. Deshalb ist davon auszugehen, dass bei unzureichendem Spritzbelag die Wirkungsdauer kürzer ist. Eine Möglichkeit die Qualität des Modells zu verbessern wäre aus diesem Grund die Berücksichtigung der verwendeten Applikationstechnik und deren Einfluss auf die Wirkungsdauer von Fungiziden. Dafür müssten zum Beispiel die verwendete Düsenart, die Fahrgeschwindigkeit, die Wassermenge und der Abstand der Düsen zu den Pflanzen bekannt sein. Der schlagspezifisch vorherrschende Befallsdruck wird bei der Berechnung der Fungizidwirkungsdauer bisher nicht berücksichtigt. Es gibt allerdings Hinweise darauf, dass es durch einen hohen Befallsdruck zu einer Verringerung der Wirkung beziehungsweise zu einer Verkürzung der Wirkungsdauer von Fungiziden kommen kann. In Blattsegmenttests mit Erysiphe graminis f. sp. hordei wurde gezeigt, dass die ED50-Werte ("effective dose") von Fenpropimorph und Triadimenol positiv mit der Inokulumsmenge korreliert sind. Je höher die Inokulumsmenge, desto höher war der ED50-Wert der Fungizide. Für Propiconazol allerdings wurde keine positive Korrelation nachgewiesen (Damgaard und Nielsen, 1999). In anderen Untersuchungen wurde gezeigt, dass der MIC-Wert ("minimal inhibitory concentration") positiv mit der Inokulumsdichte korreliert ist (Brown, 2006). Ein Vergleich von Versuchen mit mittlerem bis starkem und schwachem Befall von Sclerotinia sclerotiorum an Winterraps hat gezeigt, dass die Fungizidwirkung bei schwachem Befall besser ist. Bei einem starkem Befall (Befallshäufigkeit in unbehandelter Kontrolle = 35%) wurde mit Proline (250 g/l Prothioconazol) beispielsweise ein Wirkungsgrad von circa 60% erreicht, bei einem schwachem Befall (Befallshäufigkeit in unbehandelter Kontrolle = 15%) hingegen 100% Wirkungsgrad. Auch die Fungizide Cantus Gold (200 g/l Boscalid + 200 g/l Dimoxystrobin), Harvesan (250 g/l Flusilazol + 125 g/l Carbendazim), Orius (200 g/l Tebuconazol) und Ortiva (250 g/l Azoxystrobin) wiesen bei schwachem Befall bessere Wirkungsgrade auf (Graf und Kruger, 2009). In den Parzellenversuchen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Fungizidwirkung bei einem hohen Infektionsdruck mit Z. tritici kürzer ist als bei einem niedrigen Befallsdruck (siehe Kapitel 2.4.2.1). Im Jahr 2013 herrschte an den Standorten Biedesheim und Münstermaifeld ein starker Befallsdruck mit Z. tritici (siehe Anhang Abb. 28). Zu BBCH 39 waren die unteren Blattetagen bereits stark mit Z. tritici befallen. In Biedesheim wiesen die Blattetagen F-2 und F-3 40 und 45% Befallshäufigkeit auf. Die gleichen Blattetagen waren in Münstermaifeld zu 24 und 63% befallen. Zu BBCH 75 war an beiden Standorten auf F bis F-2 eine Befallshäufigkeit von 100% festzustellen. Die Wirkungsdauer im Jahr 2013 war zwischen drei und acht Tagen kürzer als die durchschnittliche Wirkungsdauer in den Jahren 2012 und 2014. Diese Erkenntnisse weisen darauf hin, dass eine Betrachtung der Wirkungsdauer von Fungiziden unter Berücksichtigung des Befallsdrucks zu einer deutlichen Verbesserung des Modells führen könnten. Um den schlagspezifischen Befallsdruck berücksichtigen zu können, müsste das Modell OPTIFUNG mit einem Modell verknüpft werden, welches die genaue Befallsentwicklung prognostiziert. Zum Einfluss des Befallsdrucks auf die Wirkungsdauer sollten weitere Versuche durchgeführt werden. Auch sollte untersucht werden, ob die Fungizide ähnlich auf unterschiedlich hohe Befallsdrücke reagieren.

Die **Kurativwirkung** der Fungizide wird bisher mit einer festen Regel für alle Fungizide mit kurativen Wirkungseigenschaften berücksichtigt (siehe Kapitel 3.6). Der in dieser Arbeit durchgeführte Halbfreilandversuch zur kurativen Wirkung von Epoxion und Imbrex hat jedoch große Unterschiede zwischen den beiden Produkten gezeigt (siehe Kapitel 2.1.5 und

3.4.3). Es sollten deshalb weitere Versuche durchgeführt werden, um die kurative Wirkung von Fungiziden zu untersuchen. Eine Option wäre die Bewertung der kurativen Wirkung in Abhängigkeit von der Wirkstoffgruppe. Ein Problem könnten dann jedoch Tankmischungen mit Wirkstoffen aus verschiedenen Gruppen und reduzierte Aufwandmengen darstellen.

Eine weitere Ergänzungsmöglichkeit für das Modell ist die Ausgabe einer konkreten Mittelempfehlung. Dafür könnte das Modell SIG ("Schaderreger-Infektions-Gefahr") genutzt werden (Falke und Racca, 2009). Mit den prognostizierten Infektionswahrscheinlichkeiten für verschiedene Schaderreger ließen sich mit Hilfe der Fungizidbewertungstabellen ein oder mehrere Mittel auswählen. Die Fungizidbewertungstabellen müssten dazu so analysiert werden, dass Mittel ausgewählt werden, welche die beste Wirkungseinschätzung gegen die entsprechende Schaderregerkombination haben.

Von den genannten Ergänzungsmöglichkeiten sind der Befallsdruck und die Bedingungen zum Zeitpunkt der Applikation vermutlich die Parameter mit dem größten Potential für eine wesentliche Verbesserung des Modells. Der Befallsdruck hat nachweislich einen Einfluss auf die Wirkungsdauer der Fungizide. Die vorherrschenden Bedingungen zum Zeitpunkt der Applikation tragen vermutlich in nicht unerheblichen Maße dazu bei, wie viel Wirkstoff in die Pflanze aufgenommen wird. Diese Menge wiederum beeinflusst die Wirkung und die Wirkungsdauer der Fungizide. Denn je mehr Wirkstoff in die Pflanze aufgenommen wird, desto länger sind ausreichend wirksame Konzentrationen des Wirkstoffs vorhanden.

4.6 Ausblick - Nutzung des Modells OPTIFUNG in der Praxis

Das Modell OPTIFUNG wird in der Saison 2015 von der ZEPP in Zusammenarbeit mit den PSD der Länder in der Praxis getestet werden. Danach soll das Modell validiert werden und etwaige notwendige Anpassungen vorgenommen. Nach der Testphase soll das Modell Nutzern über die Internetplattform www.isip.de (Röhrig, 2007) zur Verfügung gestellt werden (siehe Kapitel 3.6). Durch die Verknüpfung mit Modellen wie SIMONTO und SEPTRI wird die Informationskette, die den Landwirt in seiner Entscheidungsfindung unterstützt, weiter vervollständigt. Von der Bestandesentwicklung über Infektionsereignisse auf ertragsrelevanten Blattetagen und dem daraus abgeleiteten optimalen Applikationstermin, kann nun auch die Wirkungsdauer des angewendeten Fungizids prognostiziert werden. Fungizidapplikationen können so zielgerichteter und umweltschonender als bisher durchgeführt werden.

5 Zusammenfassung

Nach den umweltpolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung für einen integrierten Pflanzenschutz wird gefordert, Pflanzenschutzmittelapplikationen in Abhängigkeit von dem Befallsgeschehen umwelt- und ressourcenschonend durchzuführen. Der Praxis stehen bereits unterschiedliche Prognosemodelle zur Verfügung, welche das Befallsgeschehen verschiedenster Schaderreger simulieren und die dazu genutzt werden können eine Applikation optimal zu terminieren. Nach erfolgter Applikation sind Landwirte jedoch insbesondere auf ihre Erfahrung angewiesen, über die Notwendigkeit und den Zeitpunkt einer Folgeapplikation zu entscheiden. Das Ziel dieser Arbeit war deshalb die Entwicklung eines Modells zur Prognose der Wirkungsdauer von Fungiziden an Winterweizen gegen *Zymoseptoria tritici*.

In Freiland- und Laborversuchen wurden die Wirkung und die Wirkungsdauer der Fungizide Bravo 500 (500 g/l Chlorthalonil), Epoxion (125 g/l Epoxiconazol) und Imbrex (62,5 g/l Fluxapyroxad) sowie der Mischung Epoxion+Imbrex mit wissenschaftlichen Methoden untersucht. Es wurden insgesamt neun Parzellenversuche in den Jahren 2012 bis 2014 im Freiland durchgeführt. An einem Standort erfolgte ab der Applikation zusätzlich zu den Bonituren wöchentlich eine Analyse der Wirkstoffgehalte in den Blättern. In Halbfreilandversuchen mit Winterweizen in Töpfen wurde außerdem die Wirkungsdauer der Fungizide in Abhängigkeit vom Niederschlag untersucht. Darüber hinaus wurde ein Halbfreilandversuch zur kurativen Wirkung von Epoxion und Imbrex in Abhängigkeit von der Latenzzeit von*Z. tritici* durchgeführt. Die Untersuchung der Einflüsse von Temperatur und Konzentration auf das Wachstum von *Z. tritici* und des Einflusses der Temperatur auf die Fungizide erfolgte mit Hilfe von Mikrotitertests im Labor.

Für die Modellerstellung wurde eine Methode zur Berechnung der Fungizidwirkungsdauer entwickelt. Der Kernpunkt dieser Methode ist die Berechnung des Befallsanstiegs für die unbehandelte Kontrolle und die Fungizidvariante basierend auf den Ergebnissen der Parzellenversuche. Ist der Befallsanstieg beider Varianten identisch, wird die Wirkung als beendet betrachtet. Von diesem Zeitpunkt wird dann die dynamisch berechnete Latenzzeit von *Z. tritici* abgezogen. Auf diese Weise wird der Tag ermittelt, ab dem die Wirkung des Fungizids nicht mehr ausgereicht hat, um das Blatt vor einer Infektion zu schützen. Die berechnete Wirkungsdauer lag im Mittel je nach Fungizid zwischen 16,2 und 22,0 Tagen. Durch einen

5 Zusammenfassung

Vergleich der berechneten Wirkungsdauer mit der berechneten Infektionswahrscheinlichkeit für *Z. tritici* und den Wirkstoffgehalten in den Blättern zum berechneten Wirkungsende, konnte bestätigt werden, dass die mit dieser Methode berechnete Wirkungsdauer plausibel ist. Da die Methode auf allgemeinen epidemiologischen Grundlagen basiert, ist sie nicht nur für *Z. tritici* an Winterweizen, sondern auch auf jedes andere Pathosystem anwendbar.

Die Modellierung der Fungizidwirkungsdauer erfolgte mit der berechneten Wirkungsdauer der Fungizide. Hierfür wurde die Methode der binären multiplen logistischen Regression angewendet. Mit dieser wurden die Temperatur, der Niederschlag und je nach Fungizid auch die relative Luftfeuchte als Wetterparameter mit signifikantem Einfluss auf die Wirkungsdauer identifiziert. In den Labor- beziehungsweise Halbfreilandversuchen konnte ein Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Wirkungsdauer jedoch nicht nachgestellt werden. Es wurde deshalb geschlussfolgert, dass diese Faktoren in erster Linie den pflanzlichen Stoffwechsel und das Pflanzenwachstum beeinflussen. In zweiter Linie wird dadurch auch die Wirkungsdauer der Fungizide beeinflusst, wie zum Beispiel durch eine erhöhte Metabolisierung oder Verdünnung des Wirkstoffs. Insgesamt wurden drei verschiedene Modellfunktionen entwickelt. Jeweils eine für Fungizide mit "mittlerer", "guter" und " sehr guter" Wirkung. Damit ist es möglich das Modell nicht nur für die in dieser Arbeit untersuchten Fungizide zu nutzen, sondern für alle Fungizide und Fungizidmischungen, die sich in diese Gruppen einordnen lassen. Die Einordnung der Fungizide basiert auf den Fungizidbewertungstabellen der Pflanzenschutzdienste der Länder und wird jährlich aktualisiert. Somit müssen keine aufwendigen Versuche durchgeführt werden, um das Modell zu aktualisieren. Auch eine verringerte Wirkungsdauer, wie sie zum Beispiel durch Resistenzen entsteht, wird auf diese Weise direkt berücksichtigt.

Das entwickelte Modell trägt den Namen OPTIFUNG und prognostiziert in Abhängigkeit der Wetterparameter Temperatur, Niederschlag und relativer Luftfeuchte die Wirkungsdauer von Funigziden. Das Modell OPTIFUNG soll mit den Modellen SIMONTO (Ontogenese-modell) und SEPTRI (*Zymoseptoria tritici*-Modell) verknüpft und auf der Internetplattform www.isip.de zugänglich gemacht werden. Somit kann der Nutzer zukünftig informiert werden, wenn entweder eine neue, nicht mitbehandelte Blattetage infiziert wird oder die Wirkungsdauer abgelaufen ist und die Wahrscheinlichkeit für eine neue Infektion mit *Z. tritici* groß ist.

In dieser Arbeit wurde am Beispiel von *Z. tritici* eine allgemeingültige Methode zur Berechnung der Wirkungsdauer von Fungiziden entwickelt. Das daraus entstandene Modell ist durch die Bildung von Wirkungsgruppen für weitere Fungizide anwendbar und bietet dem Nutzer in Zukunft eine objektive und dynamische Unterstützung bei der Planung der Fungizidapplikationen.

Summary

One important ecopolitical aim of the German federal government relating to integrated plant protection is, to realize applications of plant protection products environmentally friendly and resource-conserving dependent on disease occurrence. There are many different decision support systems available for farmers, which simulate the occurrence and development of various diseases. These systems can be used for timing the application of plant protection products optimally. However, after the application, farmers are dependent on their own experience for deciding on the necessity and timing of a following application. Therefore, the aim of this thesis was the development of a model to predict the duration of efficacy of fungicides against *Zymoseptoria tritici* in winter wheat. Such a tool would greatly help farmers in their decision making, ultimately leading to a reduction of unnecessarily applied fungicides.

The efficacy and lasting effect of the fungicides Bravo 500 (500 g/l chlorothalonil), Epoxion (125 g/l epoxiconazole), and Imbrex (62,5 g/l fluxapyroxad), as well as a mixture of Epoxion+Imbrex, was examined in field and laboratory trials. Nine plot trials were conducted throughout 2012 to 2014. From application on, the active ingredient content in the leaves was analyzed at one site on a weekly basis. In potted plant trials with winter wheat the lasting effect of the fungicides dependent on precipitation was examined. Furthermore, one potted plant trial was conducted to investigate the curative effect of Epoxion and Imbrex dependent on the latency period of *Z. tritici*. The Influence of temperature and fungicide concentration on the growth of *Z. tritici*, and the influence of temperature in the fungicide, were examined in the laboratory with microtiter tests.

For the construction of the model a method for calculating the lasting effect of fungicides was developed. The key point of this method is the calculation of the disease increase for the untreated control and the fungicide treatment, based on the results of the plot trials. If the disease increase of both is identical, the lasting effect is considered to be expired. The dynamically calculated latency period of *Z. tritici* is subtracted from this epoch. In doing so, the day starting from the efficacy of the fungicide is insufficient to protect the leaf against infections is determined. The calculated durations of efficacy lay between 16.2 days and 22.0 days on average, depending on the fungicide. By means of a comparison of the

5 Zusammenfassung

calculated durations of efficacy with a calculated infection probability of *Z. tritici* and the active ingredient content in the leaves at time of calculated end of efficacy, it was confirmed that the calculated durations of efficacy are plausible. Because the method is based on general epidemiological principles, it is not only usable for *Z. tritici* on winter wheat, but also for other pathosystems.

Modeling the lasting effect was done with the calculated durations of efficacy of the fungicides. Therefore, a binary multiple-logistic regression was used. With this method temperature, precipitation, and depending on the fungicide also the relative humidity, were identified as parameters with significant influence on the lasting effect. Influences of temperature and precipitation on the lasting effect were not observable in laboratory or potted plant trials. Thus it was concluded that these parameters influence the plant metabolism and the plant growth in the first instance. In the second instance, the lasting effect of the fungicides is influenced through an enhanced metabolism or a dilution of the active ingredient.

Altogether three different model functions were developed – one for each, fungicides with "medium", "good", and "very good" efficacy. With this it is possible to use the model not only for the considered fungicides, but for all fungicides and fungicide mixtures which can be classified in these three groups. The classification is based on the "fungicide evaluation tables" of the plant protection services and is updated annually. By doing this, no further time-consuming trials are necessary to keep the model up to date. Also, reduced durations of efficacy, for instance caused by resistances, can be directly considered with this method.

The developed model is named OPTIFUNG and predicts the lasting effect of fungicides dependent on the weather parameters temperature, precipitation, and relative humidity. It is planned to link OPTIFUNG with the already existing models SIMONTO (ontogenesis model) and SEPTRI (*Zymoseptoria tritici* model), and further to integrate it on the internet platform www.isip.de. The user will be informed if a new, non-treated leaf layer will be infected, or if the lasting effect has expired and the probability for a new infection with *Z. tritici* is high.

Using the example of *Z. tritici*, a generally valid method for the calculation of the lasting effect of fungicides was developed in this thesis. By defining efficacy classes, the developed model is applicable to all fungicides and provides an objective and dynamic support for the planning of fungicide applications.

Literaturverzeichnis

- Agrios, G. (2005). Plant Pathology. Elsevier Academic Press, London, UK, 5 Edition.
- Albers, S., Klapper, D., Konradt, U., Walter, A. und Wolf, J. (2009). Methodik der empirischen Forschung. GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 3 Edition.
- Analytis, S. und Kranz, J. (1972). Über die Korrelation zwischen Befallshäufigkeit und Befallsstärke bei Pflanzenkrankheiten. *Phytopathologische Zeitschrift*, 73, S. 201–207.
- Anastassiades, M. (2010). DIN EN 15662 Pflanzliche Lebensmittel Bestimmung von Pestizidrückständen mit GC-MS und/oder LC-MS/MS nach Acetonitril-Extraktion/Verteilung und Reinigung mit dispersiver SPE - QuEChERS-Verfahren; Deutsche Fassung EN 15662:2008. DIN-Mitteilungen, S. 8.
- Angioni, A., Aguilera Del Real, A., Russo, M., Melis, M., Cabitza, F. und Cabras, P. (2003a). Triazole fungicide degradation in peaches in the field and in model systems. *Food Additives and Contaminants*, 20(4), S. 368–374.
- Angioni, A., Garau, V., Aguilera Del Real, A., Melis, M., Minelli, E., Tuberoro, C. und Cabras, P. (2003b). GC-ITMS determination and degradation of captan during winemaking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, S. 6761–6766.
- Arraiano, L., Brading, P. und Brown, J. (2001). A detached seedling leaf technique to study resistance to *Mycosphaerella graminicola* (anamorph *Septoria tritici*) in wheat. *Plant Pathology*, 50(3), S. 339–346.
- Bahat, A., Gelernter, I., Brown, M. und Eyal, Z. (1980). Factors affecting the vertival progression of Septoria leaf blotch in short-staturated wheats. *Phytopathology*, 70, S. 179– 184.
- **Baloch, R.** (2000). Experimental Approaches for Plant Metabolism Studies. In: T. Roberts (Ed.), Metabolism of Agrochemicals in Plants, S. 5–42, Wiley & Sons, LTD, GB.

- Bär, H., Bergmann, E., Dittrich, R., Engelhardt, M. und Ewert, K. (2012). Hinweise zum sachkundigen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau und auf Grünland. Landesamt für ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung - Brandenburg, Frankfurt (Oder).
- Bartlett, D., Clough, J., Godwin, J., Hall, A., Hamer, M. und Parr-Dobrzanski, B. (2002). The strobilurin fungicides. *Pest Management Science*, 58, S. 649–662.
- Bedos, C., Cellier, P., Calvet, R., Barriuso, E. und Gabrielle, B. (2002). Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview. *Agronomie*, 22, S. 21–33.
- Bentson, K. (1990). Fate of xenobiotics in foliar pesticide deposits. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 114, S. 125–161.
- Bertelsen, J., de Neergaard, E. und Smedegaard-Petersen, V. (2001). Fungicidal effects of azoxystrobin and epoxiconazole on phyllosphere fungi, senescence and yield of winter wheat. *Plant Pathology*, 50, S. 190–205.
- Bickers, U., Oerke, E.C. und Dehne, H.W. (1999). Influence of Formulation and Application on the Biological Availability and Efficacy of Systemic Fungicides. In: H. Lyr, P. Russell, H.W. Dehne und H. Sisler (Eds.), Modern Fungicides and Antifungal Compounds, Volume II, S. 131–136, Intercept Ltd., Andover, UK.
- Bleyer, K. und Kast, W. (2013). OiDiag 3.0 im Prognose-Einsatz. *Der Badische Winzer*, S. 38–43.
- **BMELV** (2013). Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.
- Bolton, M., Kolmer, J. und Garvin, D. (2008). Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology*, 9(5), S. 563–575.
- **Börner, H.** (2009). Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Springer-Verlag, Berlin, 8. Edition.
- Brenneman, T., Sumner, H. und Harrison, G. (1990). Deposition and retention of chlorothalonil applied to peanut foliage: effect of application methods, fungicide formulations and oil additives. *Peanut Science*, 17(2), S. 80–84.

- Brown, J. (2006). Surveys of Variation in Virulence and Fungicide Resistance and Theier Application to Disease Control. In: B. Cooke, D. Gareth-Jones und B. Kaye (Eds.), The Epidemiology of Plant Diseases, S. 81–116, Springer, Dordrecht, NL.
- **Bruhn, J. und Fry, W. (1982)**. A mathematical model of the spatial and temporal dynamics of chlorothalonil residues on potato foliage. *Phytopathology*, 72, S. 1306–1312.
- Bryson, R., Sylvester-Bradley, R., Scott, R. und Paveley, N. (1995). Reconciling the effects of yellow rust on yield of winter wheat through measurements of green leaf area and radiation interception. *Aspects of Applied Biology*, 42, S. 9–18.
- **Buchholz, A.** (2006). Characterization of the diffusion of non-electrolytes aross plant cuticles: properties of the lipophilic pathway. *Journal of Experimental Botany*, 57, S. 2501–2513.
- Bühl, A. (2008). SPSS 16: Einführung in die moderne Datenanalyse. Pearson Studium -Scientific Tools, Pearson Studium.
- **Bundessortenamt** (**2013**). Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Hannover.
- **BVL** (2010). PSM Zulassungsbericht CREDO. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Braunschweig.
- **BVL** (**2014**a). Absatz an Pflanzenschutzmitteln in der Bundesrepublik Deutschland Ergebnisse der Meldungen gemäss Paragraph 64 Pflanzenschutzgesetz für das Jahr 2013. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Braunschweig.
- **BVL (2014b).** Zulassungsinformation Chlorthalonil. online, URL https://portal.bvl.bund. de/psm/jsp/ListeMain.jsp?page=1&ts=1411982016167, letzter Zugriff am 29.09.2014.
- **Campbell, C. und Madden, L. (1990)**. Introduction to Plant Disease Epidemiology. John Wiley & Sons Inc, New York, USA.
- **Casida, J. und Lykken, L. (1969)**. Metabolism of organic pesticide chemicals in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 20, S. 607–636.
- **Castle, M. und Gilligan, C. (2012)**. An epidemiological framework for modelling fungicide dynamics and control. *PloS ONE*, 7, S. e40941.
- **Cecchini, G. (2003)**. Function and structure of complex II of the resipiratory chain. *Annual Review of Biochemistry*, 752, S. 77–109.

- Ceynowa, J., Lindenberg, H. und Piening, G. (1993). Epidemiologie und infektionsbezogene Bekämpfung der Blattdürre (*Septoria tritici*) an Winterweizen. *Gesunde Pflanzen*, 45(4), S. 155–162.
- Clark, W. (2006). Fungicide resistance: Are we winning the battle but losing the war? *Aspects of Applied Biology*, 78, S. 119–126.
- **Cochran, W.** (1947). Some consequences when the assumptions for the analysis of variance are not satisfied. *Biometrics*, 3(1), S. 22–38.
- Cohen, L. und Eyal, Z. (1993). The histology of processes associated with the infection of resistant and susceptible wheat cultivars with *Septoria tritici*. *Plant Pathology*, 42(5), S. 737–743.
- Cole, D. und Edwards, R. (2000). Secondary Metabolism of Agrochemicals in Plants. In: T. Roberts (Ed.), Metabolism of Agrochemicals in Plants, S. 107–154, Wiley & Sons, LTD, GB.
- Cook, R. (1999). Septoria on Cereals: Management by Chemicals. In: J. Lucas, P. Bowyer und H. Anderson (Eds.), Septoria on Cereals: a Study of Pathosystems, S. 286–298, CABI International, Wallingford, UK.
- Cools, H. und Fraaije, B. (2008). Are azole fungicides losing ground against Septoria wheat disease? Resistance mechanisms in *Mycosphaerella graminicola*. *Pest Management Science*, 64, S. 681–684.
- **Cools, H. und Fraaije, B. (2013)**. Update on mechanisms of azole resistance in *Mycosphaerella graminicola* and implications for future control. *Pest Management Science*, 69, S. 150–155.
- **Copping, L. und Hewitt, H.** (1998). Chemistry and Mode of Action of Crop Protection Agents. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- Cunfer, B. (1997). Taxonomy and nomenclature of Septoria and Stagonospora species on small grain cereals. *Plant Disease*, 81(5), S. 427–428.
- Currier, H. und Dybing, C. (1959). Foliar penetration of herbicides review and present status. *Weeds*, 7, S. 195–213.
- **Damgaard, C. und Nielsen, B.** (1999). The effect of fungal density on fungicide doseresponse curves in barley powdery mildew (*Erysiphe graminis* f.sp. *hordei*). *Phytopathology*,

48, S. 402–407.

- **Davidse, L.** (1976). Metabolic conversion of methyl benzimidazol-2-yl carbamate (MBC) in *Aspergillus nidulans. Pesticide Biochemistry and Physiology*, 6(6), S. 538 546.
- de Vallavieille-Pope, C., Huber, L., Leconte, M. und Goyeau, H. (1995). Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration, and infection of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology*, 85, S. 409–415.
- **Dixon, D., Cole, D. und Edwards, R.** (1997). Characterisation of multiple glutathione tranferases containing the GST I subunit with activities towards herbicide substrates in maize (*Zea mays*). *Pesticide Science*, 50, S. 72–82.
- **Duncan, K. und Howard, R. (2000)**. Cytological analysis of wheat infection by the leaf blotch pathogen *Mycosphaerella graminicola*. *Mycological Research*, 104(9), S. 1074–1082.
- **Dutt, S. und Gill, K. (1978)**. Diurnal changes in leaf water potential of rice, barley and wheat. *Biologia Plantarum*, 20(6), S. 472–474.
- Earley, F. (2012). Fungicides Acting on Oxidatice Phosphorylation The Biochemistry of Oxidative Phosphorylation: A Multiplicity of Targets for Crop Protection Chemistry. In: W. Krämer, U. Schirmer, P. Jeschke und M. Witschel (Eds.), Modern Crop Protection Compounds, Volume 2 Fungicides, S. 559–583, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Edgington, L., Martin, R., Bruin, G. und Parsons, I. (1980). Systemic fungicides: a perspective after 10 years. *Plant Disease*, 64, S. 19–23.
- Edgington, L., Walton, G. und Miller, P. (1966). Fungicide selective for basidiomycetes. *Science*, 153, S. 307–308.
- **EFSA** (2008). Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance epoxiconazole. *EFSA Scientific Report*, 138, S. 1–80.
- **EFSA** (2012a). Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance fluxapyroxad (BAS 700 F). *EFSA Journal*, 10(1), S. 1–90.
- **EFSA** (2012b). Reasoned opinion on the review of the existing maximum residue levels (MRLs) for chlorothalonil according to article 12 of regulation (EC) No 396/2005. *EFSA*

Journal, 10(10), S. 1-87.

- Elliott, V. und Spurr, H. (1993). Temporal dynamics of chlorothalonil residues on peanut foliage and the influence of weather factors and plant growth. *Plant Disease*, 77(5), S. 455–460.
- Eriksen, L., Shaw, M. und Østergård, H. (2001). A model of the effect of pseudothecia on genetic recombination and epidemic development in populations of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology*, 91(3), S. 240–248.
- **Erven, T.** (2011). Simulation der Epidemie von Septoria tritici an Winterweizen mit dem Modell SEPTRI2 unter besonderer Berücksichtigung der Sortenanfälligkeit. Ph.D. Thesis, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Eversmeyer, M., Kramer, C. und Hassan, Z. (1988). Environmental influence on the establishment of *Puccinia recondita* infection structures. *Plant Disease*, 72, S. 409–412.
- **Eyal, Z.** (1971). The kinetics of pycnospore liberation in *Septoria tritici*. *Canadian Journal of Botany*, 49(7), S. 1095–1099.
- **Eyal, Z.** (1999). The *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum* blotch diseases of wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 105(7), S. 629–641.
- Eyal, Z., Scharen, A., Prescott, J., Ginkel und Van, M. (1987). The Septoria Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management. CIMMYT, Mexico, MEX.
- Falke, K. und Racca, P. (2009). Entscheidungshilfesystem SIG. *Getreidemagazin*, 14(2), S. 102–103.
- FAO (2010). Pesticide residues in food 2010 evaluations part I residues. FAO Plant Production and Protection Paper, 206, S. 269–494.
- Fonné-Pfister, R., Gaudin, J., Kreuz, K., Ramsteiner, K. und Ebert, E. (1990). Hydroxylation of primisulfuron by an inducible cytochrome P450-dependent monooxygenase system from maize. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 37, S. 165–173.
- Fraaije, B., Cools, H., Kim, S.H., Motteram, J., Clark, W. und Lucas, J. (2007). A novel substitution I381V in the sterol 14alpha-demethylase (CYP51) of *Mycosphaerella graminicola* is differentially selected by azole fungicides. *Molecular Plant Pathology*, 8, S. 245–254.

- Frahm, J., Volk, T. und Johnen, A. (1996). Development of the PRO-PLANT decisionsupport system for plant protection in cereals, sugarbeet and rape. *EPPO Bulletin*, 26, S. 609–622.
- Garau, V., Angioni, A., Del Real, A., Russo, M. und Cabras, P. (2002). Disappearance of azoxystrobin, pyrimethanil, cyprodinil, and fludioxonil on tomatoes in a greenhouse. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, S. 1929–1932.
- Garau, V.L., de Melo Abreu, S., Caboni, P., Angioni, A. und Alves, A. Cabras, P. (2009). Residue-free wines: fate of some quinone outside inhibitor (QoI) fungicides in the winemaking process. *Jorunal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, S. 2329–2333.
- Garland, S., Menary, R. und Davies, N. (1999). Dissipation of propiconazole and tebuconazole in peppermint crops (*Mentha piperita* (Labiatae)) and their residues in distilled oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, S. 294–298.
- Gaskin, R. und Steele, K. (2009). A comparison of sticker aadjuvant for their effects on retention and rainfastening of fungicide sprays. *New Zealand Plant Protection*, 62, S. 339–342.
- Gent, D., Schwartz, H. und Nissen, S. (2003). Effect of commercial aadjuvant on vegetable crop fungicide coverage, absorption, and efficacy. *Plant Disease*, 87, S. 591–597.
- Gisi, U., Pavic, L., Stanger, C., Hugelshofer, U. und Sierotzki, H. (2004). Dynamics of *Mycosphaerella graminicola* Populations in Response to Selection by Different Fungicides.
 In: H.W. Dehne, U. Gisi, K. Kuck, P. Russell und H. Lyr (Eds.), Modern Fungicides and Antifungal Compounds IV, S. 89–101, BCPC, Alton, UK.
- Glättli, A., Grote, T. und Stammler, G. (2011). SDH-Inhibitors: History, Biological Performance and Molecular Mode of Action. In: Modern Fungicides and Antifungal Compounds, Volume VI, S. 159–169, Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
- Gough, F. (1978). Effect of wheat host cultivars on pycnidiospore production by *Septoria tritici*. *Phytopathology*, 68, S. 1343–1345.
- **Graf, T. und Kruger, B.** (2009). Aktuelle Empfehlungen zum Fungizid- und Wachstumsreglereinsatz in Winterraps 2009.
- Halama, P. (1996). The occurrence of *Mycosphaerella graminicola*, teleomorph of *Septoria tritici* in France. *Plant Pathology*, 45(1), S. 135–138.

- Hallmann, J., Quadt-Hallmann, A. und von Tiedemann, A. (2009). Phytomedizin: Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer KG, Stuttgart.
- Hardwick, N., Jones, D. und Slough, J. (2001). Factors affecting diseases of winter wheat in England and Wales, 1989-98. *Plant Pathology*, 50(4), S. 453–462.
- Harris, R. (1999). Guttation the basis of an assay for evaluating formulation behaviour in vivo. *Pesticide Science*, 55, S. 582–584.
- Hartleb, H., Hartmann, G., Wolff, C. und Ruecker, P. (1995). Die Ertragswirksamkeit des Braunrostes (*Puccinia recondita* Rob. ex Dem.) an Weizen und Roggen sowie des Zwergrostes (*Puccinia hordei* Otth) an Gerste bei unterschiedlich resistenten Sorten in Sachsen-Anhalt. Gesunde Pflanzen, 47, S. 49–64.
- Hatton, P., Cole, D. und Edwards, E. (1996). Influence of plant age on glutathione levels and glutathione transferaes involved in herbicide detoxification in corn (*Zea mays* L.) and giant foxtail (*Setaria faberi* Herrm). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 54, S. 199–209.
- Hau, B. (1988). Ein erweitertes analytisches Modell f
 ür Epidemien von Pflanzenkrankheiten.Ph.D. Thesis, Justus-Liebig Universitaet, Giessen.
- Henriet, F., Deloy, S., Pigeon, O. und Moreau, J.M. (2005). Fate of epoxiconazole and kresoxim-methyl in wheat according to time of application. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 70(4), S. 1013–1022.
- Hess, D. und Shaner, G. (1987). Effect of moisture and temperature on development of *Septoria tritici* blotch in wheat. *Phytopathology*, 77, S. 215–219.
- **Hewitt, H.** (**1998**a). Fungicide Performance. In: Fungicides in Crop Protection, S. 87–148, CAB International, Wallingford, UK.
- **Hewitt, H.** (**1998**b). The Fungicides Market. In: Fungicides in Crop Protection, S. 12–57, CAB International, Wallingford, UK.
- **HGCA** (2013). Fungicide Performance in Wheat 2013. URL http://www.hgca.com/media/ 302481/wheat-fungicide-performance-data-2013.pdf, letzter Zugriff am 04.11.2014.
- Hims, M. und Cook, R. (1991). The use of rainfall an accumulated mean temperature to indicate fungicide activity in the control of leaf diseases of winter wheat in the UK.*EPPO Bulletin*, 21, S. 477–484.

- Hobbelen, P., Paveley, N., Fraaije, B., Lucas, J. und van den Bosch, F. (2011). Derivation and testing of a model to predict selection for fungicide resistance. *Plant Pathology*, 60, S. 304–313.
- Hoffmann, G. und Schmutterer, H. (1999). Parasitäre Krankheiten und Schädlinge an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- Holmes, S. und Colhoun, J. (1974). Infection of wheat by *Septoria nodorum* and *Septoria tritici* in relation to plant age, air temperature and relative humidity. *Transactions of the British Mycological Society*, 63(2), S. 329–338.
- Huerta-Espino, J., Singh, R., German, S., McCallum, B., Park, R., Chen, W., Bhardwaj,
 S. und Goyeau, H. (2011). Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica*, 179, S. 143–160.
- Ivic, D. (2010). Curative and Eradicative Effects of Fungicides. In: O. Carisse (Ed.), Fungicides, InTech, Rijeka, Croatia.
- Johnen, A. und Newe, M. (2005). proPlant expert.classic Optimales Pflanzenschutzmanagement mit der neuen CD-Version. *Getreidemagazin*, 10, S. 42–45.
- Jörg, E. und Krauthausen, H. (1994). Befallshäufigkeiten bei Getreidekrankheiten und ihre Nutzung in Bekämpfungsschwelle-Systemen. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt*, 301, S. 62.
- Jorgensen, L. und Thygesen, K. (2006). Should Strobilurins Still be Used in Wheat? Danish and Foreign Experience. In: Third Danish Plant Production Congress, S. 485–486, Denmark.
- Kast, W. (1997). A step by step risk analysis (SRA) used for planning sprays against powdery mildew (OiDiag-System). *Weinwissenschaft*, 52, S. 230–231.
- Katagi, T. und Mikami, N. (2000). Primary Metabolism of Agrochemicals in Plants. In: T. Roberts (Ed.), Metabolism of Agrochemicals in Plants, S. 43–106, Wiley & Sons, LTD, GB.
- Kema, G., Sayoud, R., Annone, J. und Van Silfhout, C. (1996). Genetic variation for virulence and resistance in the wheat-*Mycosphaerella graminicola* pathosystem. II: analysis of interactions between pathogen isolates and host cultivars. *Phytopathology*, 86(2), S. 213–220.

- King, J., Cook, R. und Melville, S. (1983a). A review of Septoria diseases of wheat and barley. *Annals of Applied Biology*, 103, S. 345–373.
- King, J., Jenkins, J. und Morgan, W. (1983b). The estimation of yield losses in wheat from severity of infection by Septoria species. *Plant Pathology*, 3, S. 239–249.
- Klink, H. (1997). Geoepidemiologische Erhebungen von Weizenpathogenen in Schleswig-Holstein unter Anwendung und Entwicklung des Integrierten Pflanzenschutzsystems (IPS-Modell Weizen) für einen minimierten, bedarfsgerechten Fungizideinsatz (1993 - 1996).
 Ph.D. Thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Institut für Phytopathologie.
- Koch, H. (1978). Die Verteilung von *Erysiphe graminis* DC. f. sp. *hordei* Marchal in Gerstenbeständen und ihr Einlfluss auf die Stichprobenauswahl für Befallserhebungen. Ph.D. Thesis, Justus-Liebig-Universität Giessen.
- Krieg, U., Görtz, A., Mehl, A., Rieck, H., Suty-Heinze, A. und Viollet, D. (2010). Bixafen
 ein neuer fungizider Wirkstoff für die Krankheitsbekämpfung im Getreide. In: 428 Julius-Kühn-Archiv - 57. Deutsche Pflanzenschutztagung - Kurzfassungen der Beiträge, S. 91.
- Kuck, K, H., Leadbeater, A. und Gisi, U. (2012a). FRAC Mode of Action Classification and Resistance Risk of Fungicides. In: W. Krämer, U. Schirmer, P. Jeschke und M. Witschel (Eds.), Modern Crop Protection Compounds, Volume 2 Fungicides, S. 539–558, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Kuck, K.H., Stenzel, K. und Vors, J.P. (2012b). Sterol Biosynthesis Inhibitors. In: W. Krämer, U. Schirmer, P. Jeschke und M. Witschel (Eds.), Modern Crop Protection Compounds, Volume 2 Fungicides, S. 761–805, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Leroux, P., Albertini, C., Gautier, A., Gredt, M. und Walker, A.S. (2007). Mutations in the CYP51 gene correlated with changes in sensitivity to sterol 14alpha-demethylation inhibitors in field isolates of *Mycosphaerella graminicola*. *Pest Management Science*, 63, S. 688–698.
- Leroux, P., Gredt, M., Walker, A., Moinard, J. und Caron, D. (2004). Resistance of the Wheat Leaf Blotch Pathogen *Septoria tritici* to Fungicides in France. In: H.W. Dehne, U. Gisi, K. Kuck, P. Russell und H. Lyr (Eds.), Modern Fungicides and Antifungal Compounds IV, S. 103–113, BCPC, Alton, UK.
- Lin, H.T., Wong, S.S. und Li, G.C. (2001). Dissipation of epoxiconazole in the paddy field under subtropical conditions of Taiwan. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 36(4), S. 409–420.

- Lix, L., Keselman, J. und Keselman, H. (1996). Consequences of assumption violations revisited: a quantitative review of alternatives to the one-way analysis of variance F-Test. *Review of Educational Research*, 66(4), S. 579–619.
- Lovell, D., Parker, S., Hunter, T., Royle, D. und Coker, R. (1997). Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathology*, 46, S. 126–138.
- Madden, L., Hughes, G. und van den Bosch, F. (2007). The Study of Plant Disease Epidemics. American Phytopathological Society Press, St. Paul, Minnesota, USA.
- Magboul, A., Geng, S., Gilchrist, D. und Jackson, L. (1992). Environmental influence on the infection of wheat by *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology*, 82, S. 1407–1413.
- Matsson, M. und Hederstedt, L. (2001). The carboxin-binding site on *Paracoccus denitrificans* succinate:quinone reductase identified by mutations. *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, 33, S. 99–105.
- Mayo, D., Pike, R. und Forbes, D. (2010). Microscale Organic Laboratory: with Multistep and Multiscale Syntheses. John Wiley & Sons, GB, 5 Edition.
- Mehl, A. (2006). Monitoring Method Sensitivity of *Septoria tritici*. Technischer bericht, FRAC.
- Mehl, A. und Stenzel, K. (2008). Resistenzmanagement zur Erhaltung der Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis am Beispiel der Fungizide. In: von Tiedemann A., R. Heitefuss und F. Feldmann (Eds.), Pflanzenproduktion im Wandel Wandel im Pflanzenschutz, S. 122–137, Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
- Mehta, K. (1923). Observations and experiments on cereal rust in the neighbourghood of cambridge, with special reference to their annual recurrence. *Transcations British Mycological Society*, S. 142.
- Meier, U. (2001). Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen BBCH-Monografie. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA).
- Milne, A., N., P., Audsley, E. und Parsons, D. (2007). A model of the effect of fungicides on disease-induced yield loss, for use in wheat disease management decision support systems. *Annals of Applied Biology*, 151, S. 113–125.

- Monadjemi, S., El Roz, M., Richard, C. und Ter Halle, A. (2011). Photoreduction of chlorothalonil fungicide on plant leaf models. *Environmental Science and Technology*, 45, S. 9582–9589.
- Morton, V. und Staub, T. (2008). A short history of fungicides. doi:10.1094/ APSnetFeature-2008-0308.
- Munnecke, D., Johnson, L., Talbot, H. und Barik, S. (1982). Microbial Metabolism and Enzymology of Selected Pesticides. In: A. Chakrabarty (Ed.), Biodegradation and Detoxification of Environmental Pollutants, S. 1–32, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Northover, J. und Ripley, D. (1980). Persistence of chlorothalonil on grapes and its effect on disease control and fruit quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28, S. 971–974.
- **Obst, A. und Gehring, K. (2002)**. Getreide Krankheiten Schädlinge Unkräuter. Verlag TH. Mann, Gelsenkirchen-Buer.
- Oerke, E.C., und Schönbeck, A. (1999). Crop Protection Past and Present. In: E.C. Oerke, H.W. Dehne, F. Schönbeck und A. Weber (Eds.), Crop Production and Crop Protection: Estimated Losses in Major Food and Cash Crops, Volume 3, S. 45–71, Elsevier Science B.V., Amsterdam, NL.
- Paya, P., Anastassiades, M., Mack, D., Sigalova, I., Tasdelen, B., Oliva, J. und Barba, A. (2007). Analysis of pesticide residues using the quick easy cheap effective rugged and safe (QuEChERS) pesticide multiresidue method in combination with gas and liquid chromatography and tandem mass spectrometric detection. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 389, S. 1697–1714.
- Prochnow, J., Strobel, D., Strathmann, S. und Semar, M. (2010). Ein neuer Wirkstoff der Klasse der SDHI mit besonderer Leistung: XEMIUM. In: 428 Julius-Kühn-Archiv - 57. Deutsche Pflanzenschutztagung - Kurzfassungen der Beiträge, S. 89–90.
- Putnam, R., Nelson, J. und Clark, M. (2003). Persistence and degradation of chlorothalonil and chlorpyrifos in a cranberry bog. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, S. 170–176.
- Quaedvlieg, W., G.H.J., K., Groenewald, J., Verkley, G., Seifbarghi, S., Razavi, M., Mirzadi Gohari, A., Mehrabi, R. und Crous, P. (2011). *Zymoseptoria* gen. nov.: a new genus to accommodate Septoria-like species occurring on graminicolous hosts. *Persoonia*, 26, S. 57–69.

- Racca, P. und Jörg, E. (2007). CERBET 3 a forecaster for epidemic development of *Cercospora beticola*. *EPPO Bulletin*, 37, S. 344–349.
- Racca, P., Kleinhenz, B., Zeuner, T., Keil, B., Tschöpe, B. und J., J. (2011). Decision Support Systems in Agriculture: Administration of Weather Data, Use of Geographic Information Systems (GIS) and Validation Methods in Crop Protection Warning Service. In: C. Jao (Ed.), Efficient Decision Support Systems Practice and Challenges From Current to Future, S. 331–354, InTech, Rijeka, Croatia.
- Racca, P. und Tschöpe, B. (2011). SIMCOL a decision support system for integrated control of anthracnose on blue lupin. *Journal für Kulturpflanzen*, 63, S. 411–422.
- **Räder, T.** (2007). Entwicklung eines Prognose- und Entscheidungsmodell zur Braunrostbekämpfung in Winterroggen und Winterweizen. Ph.D. Thesis, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Rheinheimer, J., Rieck, H. und Coqueron, P.Y. (2012). Succinate Dehydrogenase Inhibitors. In: W. Krämer, U. Schirmer, P. Jeschke und M. Witschel (Eds.), Modern Crop Protection Compounds, Volume 2 Fungicides, S. 627–638, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- **Roberts, T.** (2000). Introduction Regulatory Considerations. In: T. Roberts (Ed.), Metabolism of Agrochemicals in Plants, S. 1–4, Wiley & Sons, LTD, GB.
- Roelfs, A., Singh, R. und Saari, E. (1992). The Wheat Rusts. In: G. Hettel (Ed.), Rust Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management, S. 2–6, CIMMYT, Mexico, MEX.
- **Röhrig, M. (2007)**. www.isip.de online plant protection information in Germany. *EPPO Bulletin*, 37, S. 350–352.
- Rossberg, D., Jörg, E. und Falke, K. (2005). SIMONTO ein neues Ontogenesemodell für Wintergetreide und Winterraps. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 57(4), S. 74–80.
- **Russell, P. (2005)**. A century of fungicide evolution. *Journal of Agricutural Science*, 143, S. 11–25.
- Rutherford, E. und Soddy, F. (1903). XLIV. A comparative study of the radioactivity of radium and thorium. *Philosophical Magazine Series* 6, 5(28), S. 445–457.

- Ryckaert, B., Spanoghe, P., Haesaert, G., Heremans, B., Isebaert, S. und Steurbaut, W. (2007). Quantitative determination of the influence of adjuvants on foliar fungicide residues. *Crop Protection*, 26, S. 1589–1594.
- Sanssene, J., Selim, S., Roisin-Fichter, C., Djerroud, L., Deweerb, C. und Halamab, P. (2011). Protective and curative efficacy of prothioconazole against isolates of *Mycosphaerella graminicola* differing in their in vitro sensitivity to DMI fungicides. *Pest Management Science*, 67, S. 1134–1140.
- Saur, R., Gold, R. und Ammermann, E. (1991). BAS 480 F, ein neues, breitwirksames Fungizid zur Bekämpfung von Getreidekrankheiten. *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Rijksuniversiteit Gent*, 52(2b), S. 479–489.
- Scalliet, G., Boehler, M., Bowler, J., Green, P., Kilby, P. und Fonné-Pfister, R. (2011). SDHIs and the Fungal Succinate Dehydrogenase. In: Modern Fungicides and Antifungal Compounds, Volume VI, S. 171–178, Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
- Schoefl, U. und Zinkernagel, V. (1997). A test method based on microscopic assessments to determine curative and protectant fungicide properties against *Septoria tritici*. *Plant Pathology*, 46, S. 545–556.
- Semar, M., Strobel, D., Strathmann, S. und Groeger, U. (2011). Xemium the BASF Fungicide Innovation. In: Modern Fungicides and Antifungal Compounds, Volume VI, S. 63–68, Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
- Shaner, G. und Finney, R. (1976). Weather and epidemics of Septoria leaf blotch of wheat. *Phytopathology*, 66, S. 781–785.
- Shaw, M. (1991). Interacting effects of interrupted humid periods and light on infection of wheat leaves by *Mycosphaerella gaminicola*. *Plant Pathology*, 40, S. 595–607.
- Shaw, M. und Royle, D. (1989). Airborne inoculum as a major source of *Septoria tritici* (*Mycosphaerella graminicola*) infections in winter wheat crops in the UK. *Plant Pathology*, 38, S. 35–43.
- Siegel, M. (1981). Sterol-inhibiting fungicides: effect on sterol biosynthesis and sites of action. *Plant Disease*, 65, S. 986–989.
- Simon, M., Perello, A., Cordo, C. und Struik, P. (2002). Influence of on yield, yield components, and test weight of wheat under two nitrogen fertilization conditions. *Crop Science*,

42(6), S. 1974–1981.

- Stammler, G. und Semar, M. (2011). Sensitivity of *Mycosphaerella graminicola* (Anamorph: *Septoria tritici*) to DMI fungicides across Europe and impact on field performance. *EPPO Bulletin*, 41, S. 149–155.
- Stammler, G. und Speakman, J. (2006). Microtiter method to test the sensitivity of *Botrytis cinerea* to boscalid. *Journal of Phytopathology*, 154, S. 508–510.
- Stubbs, R., Prescott, J., Saari, E. und Dubin, H. (1986). Cereal Disease Method Manual. CIMMYT, Mexico, MEX.
- Stuckey, R. und Zadocks, J. (1989). Effect of interrupted leaf wetness periods on pustule development of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* on wheat. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 95(1), S. 175–185.
- Szeto, S., Burlinson, N., Rahe, J. und Oloffs, P. (1989). Persistence of the fungicide vinclozolin on pea leaves under laboratory conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 37, S. 529–534.
- Tan, Y., Xiong, H., Shi, T., Hua, R., Wu, X., Cao, H., Li, X. und Tang, J. (2013). Photosensitizing effects of nanometer TiO2 on chlorothalonil photodegradation in aqueous solution and on the surface of pepper. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, S. 5003–5008.
- Tapparo, A., Giorio, C., Marzaro, M., Marton, D., Sold, L. und Girolami, V. (2011). Rapid analysis of neonicotinoid insecticides in guttation drops of corn seedlings obtained from coated seeds. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, S. 1564–1568.
- Thomas, M., Cook, R. und King, J. (1989). Factors affecting development of *Septoria tritici* in winter wheat and its effect on yield. *Plant Pathology*, 38, S. 246–257.
- Thompson, H. (2010). Risk assessment for honey bees and pesticides recent developments and new issues. *Pest Management Science*, 66, S. 1157–1162.
- Tillman, R., Siegel, M. und Long, J. (1973). Mechanism of action and fate of the fungicide chlorothalonil (2,4,5,6-Tetrachloroisophthalonitrile) in biological systems - 1. Reactions with cells and subcellular components of *Saccharomyces pastorianus*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 3, S. 160–167.

- Tomerlin, J., Eversmeyer, M., Kramer, C. und Browder, L. (1983). Temperature and host effects on latent and infectious periods and on uredinospore production of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici. Phytopathology*, 73, S. 414–419.
- van den Bosch, F., Paveley, N., van den Berg, F., Hobbelen, P. und Oliver, R. (2014). Mixtures as s fungicide resistance management tactic. *Phytopathology*, 104, S. 1264–1273.
- Van Eerd, L., Hoagland, R., Zablotowicz, R. und Hall, J. (2003). Pesticide metabolism in plants and microorganisms. *Weed Science*, 51(4), S. 472–495.
- van Emden, H. (2008). Statistics for Terrified Biologists. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK.
- Verreet, J., Hoffmann, G. und Portner, J. (1990). Nachweis des teleomorph Mycosphaerella graminicola (Fuckel) Schröter (Anamorph: Septoria tritici Rob. apud Desm.) in der Bundesrepublik Deutschland. Journal of Phytopathology, 130, S. 105–119.
- von Schmeling, B. und Kulka, M. (1966). Systemic fungicidal activity of 1,4-oxathiin derivatives. *Science*, 152, S. 659–660.
- Vonk, J. und Kaars Sijpesteijn, A. (1971). Methyl benzimidazol-2-ylcarbamate, the fungioxic principle of thiophanate-methyl. *Pesticide Science*, 2, S. 160–164.
- Weber, G. (1922). II. Septoria diseases of wheat. Pyhtopathology, 12, S. 537–585.
- Werner, S. (1999). Effekte von Fungizidanwendungen im Roggen- und Sommergersteanbau und ihr Einluss auf Ertrag und Verarbeitungsqualität. Ph.D. Thesis, Technische Universität München.
- Wiese, M. und Ravenscroft, A. (1979). Environmental effects on inoculum quality of dormant rust uredospores. *Phytopathology*, 69, S. 1106–1108.
- Willis, G. und McDowell, U. (1987). Pesticide persistence on foliage. *Reviews of Environ*mental Contamination and Toxicology, 100, S. 23–27.
- Zelena, V. und Veverka, K. (2007). Effect of surfactants and liquid fertilisers on transcuticular penetration of fungicides. *Plant Protection Science*, 43, S. 151–156.
- Zeuner, T. (2007). Landwirtschaftliche Schaderregerprognose mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen. Ph.D. Thesis, Johannes Gutenberg Universität.

Zongmao, C. und Haibin, W. (1997). Degradation of pesiticides on plant surfaces and its prediction - a case study on tea plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, 44, S. 303–313.

Anhang

1 Versuchsmaterialien und -geräte

1.1 Chemikalien

Agar-Agar	Kobe 1, Carl Roth GmbH & Co.KG, Karlsruhe
Bacto Peptone	Becton, Dickinson and Company, Sparks, USA
Benzimidazol purum	Fluka Analytical, Buchs, Schweiz
Bravo 500	500 g/l Chlorthalonil, Syngenta Agro GmbH, Maintal
Corbel	750 g/l Fenpropimorph, BASF SE, Ludwigshafen
D-Glucose	Merck KGaA, Darmstadt
Epoxion	125 g/l Epoxiconazol, ADAMA Deutschland GmbH, Köln
Gemüsesaft	Josef Pölz, Alztaler Fruchtsäfte GmbH, Garching/Alz
Imbrex	62,5g/l Fluxapyroxad BASF SE, Ludwicgshafen
Kalziumcarbonat CaCO ₃	Merck KGaA, Darmstadt
Kartoffelextrakt Glukose	
Agar (PDA)	Carl Roth GmbH & Co.KG, Karlsruhe
Talkum pulv.	Carl Roth GmbH & Co.KG, Karlsruhe

1.2 Nährmedien

Gemüsesaftagar

200 ml	Gemüsesaft
3 g	CaCO ₃
20 g	Agar Agar
	auf 1000 ml Aqua bidest. auffüllen
Glucose-Pepton-Medium

14,3 g Glucose7,1 g Bacto Peptone auf 1000 ml Aqua bidest. auffüllen

Kartoffelextrakt Glukose Agar (PDA)

39 g PDA auf 1000 ml Aqua bidest. auffüllen

Wasseragar

10 g	Agar-Agar
100 mg	Benzimidazol
	auf 1000 ml Aqua bidest. auffüllen

1.3 Isolate

Septoria tritici	Stamm: Q A7, Herkunft: Quarmbeck/Eckernförde, Kultur: Weizen, Jahr:
	unbekannt
Septoria tritici	Stamm: unbekannt, Herkunft: Simmern/Wahlbach, Kultur: Weizen, Jahr:
	2013 und 2014
Puccinia triticina	Stamm: unbekannt, Herkunft: Mainz-Gonsenheim, Kultur: Weizen, Jahr:
	2012

1.4 Verbrauchsmaterial

Aeraseal, luftdurchläs-	steril, VWR International GmbH, Darmstadt
sige Kunstseidenfolie	
Leuchtstoffröhre	Osram L 18 W 965 Biolux, Farbtemperatur 6500 K, Osram Licht AG,
	München
Leuchtstoffröhre	Sylvania Gro-Lux 30 W, Farbtemperatur 8500 K, Havells Sylvania
	Germany GmbH, Erlangen
Natriumdampflampe	Philips SON-T Agro 400 W, Farbtemperatur 2000 K, Philips GmbH,
	Hamburg mit Beta-Reflektor, Firma Hortilux Schréder B.V., Niederlan-
	de
neoCulture Multitest-	96 Well, flach, Gamma sterilisiert, Orange Scientific, neoLab Migge
platten	Laborbedarf-Vertriebs GmbH, Heidelberg
Petrischalen, Ø: 145mm	Höhe: 20 mm mit Belüftungsnocken, gammasterilisiert, Carl Roth
	GmbH & Co.KG, Karlsruhe
Petrischalen, Ø: 90mm	Höhe: 14 mm ohne Belüftungsnocken, gammasterilisiert, Carl Roth
	GmbH & Co.KG, Karlsruhe
Pflanzkübel, 15 l	Hermann Meyer KG, Rellingen
Pflanzkübel, 7,5 l	Hermann Meyer KG, Rellingen
Rundtöpfe,	9 x 7,2 cm, Hermann Meyer KG, Rellingen
Topfsubstrat	mittlere Struktur mit Langzeitdünger, StenderAG, Schermbeck
Winterweizen	JB Asano, Saatzucht Josef Breun GmbH & Co. KG, Herzogenaurach

1.5 Geräte

Autoklav	Labo Autoklav MLS - 3020, SANYO Sales & Marketing Europe GmbH,
	München
Beregnung	CoolNet Pro 4-Way Fogger, Netafim Ltd. Corporate Headquarters, Tel Aviv,
	Israel
Düse	ID 120 02 (Air-Injektor Flachstrahldüse), Lechler GmbH, Metzingen
Handzerstäuber	Bobby, Birchmeier Sprühtechnik AG, Stetten, Schweiz
Klimaschrank	MKKL 1200, Flohr Instruments, Nieuwegein, Niederlande
Klimaschrank	RU MED 1201, Rubarth Apparate GmbH, Laatzen
Mikroskop	Axiovert 40 CFL, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena
Photometer	EL _X 800 Universal Microplate Reader, Bio-Tek Instruments, Inc., Software
	Gen5 ELISA 1.02.8
Rückenspritze	Schachtner, Christian Schachtner Fahrzeug- und Gerätetechnik, Ludwigsburg
Sprühflasche	Feinsprüher Hobby 10 mit Doppelpumpe, 1,0 Liter Füllmenge, GLORIA
	Haus- und Gartengeräte GmbH, Witten
Sterilbank	Technoflow 2 F 120 - II GS, INTEGRA Biosciences GmbH, Fernwald
Thomakammer	Tiefe: 0,1 mm, 0,0025 mm ² , Paul Marienfeld GmbH & Co.KG, Lauda-
	Königshofen
TinyTag-	Sensoren für Temperatur und relative Luftfeuchte, Dr. Schetter, BMC GmbH,
Zweikanal-	Puchheim
Datenlogger	

2 Abbildungen und Tabellen



Abbildung 28: Befallshäufigkeiten von Zymoseptoria tritici (SEPTTR), Blumeria graminis (ERYSGT), Puccinia triticina (PUCCRT) und Puccinia striiformis (PUCCSI) an den Versuchsstandorten 2012-2014 zu BBCH 75/77 auf den oberen drei Blattetagen (F bis F-2).

Tabelle 40: Regressionskoeffizienten o	der logistischen Re	gression für die Ber	echnung der protektiven
Wirkungsdauer			

Standort	Versuchsglied	Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert	R ²
Herx12F	Wirkung	sdauer wurde aut	f Grund zu	wenig Befalls anhand	der Daten al	ogelesen
Bied12F	Wirkung	sdauer wurde aut	f Grund zu	wenig Befalls anhand	der Daten al	ogelesen
Riod13F	UK		100.000	5 250	<0.0001	0.073
Dieu151	UK	a	5 080	1 101	0.0036	0,975
		vO	22 791	1,101	<0.0001	
		XU	25,781	1,550	<0,0001	
	Bravo	a	100,000	11,089	0,0001	0,968
		b	4,638	1,284	0,0112	
		x0	38,629	1,758	<0,0001	
	Epoxion	a	100,000	7,653	<0,0001	0,984
		b	6,074	1,085	0,0014	
		x0	34,966	1,505	<0,0001	
	Imbrex	a	100,000	8,012	<0,0001	0,986
		b	2,971	0,666	0,0043	
		x0	44,523	0,783	<0,0001	
	Epoxion+Imbrex	a	100,000	10,472	<0,0001	0,982
		b	4,460	0,938	0,0031	
		x0	41,794	1,476	<0,0001	
Rose13F	UK	а	100,000	5,777	<0,0001	0,973
		b	5,393	1,162	0,0056	
		x0	24,210	1,408	<0,0001	
	Bravo	a	100,000	28,045	0,0161	0,925
		b	6,595	2,961	0,0764	
		x0	37,676	5,270	0,0008	
	Epoxion	a	100,000	9,682	0,0001	0,961

- wird auf folgender Seite fortgesetzt.

Standort	Versuchsglied	Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert	R ²
		b	3,209	1,232	0,0479	
		x0	36,982	1,436	<0,0001	
	Imbrex	а	100,000	32,000	0,0261	0,998
		b	0,849	26,742	0,9759	
		x0	44,441	14,320	0,0267	
	Epoxion+Imbrex	a	100,000	7,697	<0,0001	0,995
		b	2,217	0,687	0,0233	
		x0	44,315	0,493	<0,0001	
Bied14F	UK	a	100,000	19,657	0,0038	0,941
		b	5,721	2,140	0,0442	
		x0	37,291	3,340	0,0001	
	Bravo	a	100,000	6,482	<0,0001	0,990
		b	2,252	0,608	0,014	
		x0	43,363	0,536	<0,0001	
	Epoxion	a	100,000	4,151	<0,0001	0,993
		b	2,646	0,334	0,0005	
		x0	40,905	0,439	<0,0001	
	Imbrex	a	100,000	54,235	0,1245	0,999
		b	0,654	96,356	0,9948	
		x0	44,785	263,425	0,8717	
	Epoxion+Imbrex	a	100,000	24,762	0,0099	0,998
		b	0,840	14,551	0,9562	
		x0	44,649	28,802	0,1818	
Bied14F-1	UK	a	100,000	4,907	<0,0001	0,991
		b	2,908	0,564	0,0036	
		x0	37,986	0,582	<0,0001	
	Bravo	a	100,000	5,968	<0,0001	0,992
		b	4,074	0,634	0,0014	
-						

Tabelle 40 – *fortgesetzt*.

- wird auf folgender Seite fortgesetzt.

Standort	Versuchsglied	Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert	R ²
		x0	38,597	0,799	<0,0001	
	Epoxion	а	100,000	3,903	<0,0001	0,996
		b	3,844	0,430	0,0003	
		x0	38,172	0,518	<0,0001	
	Imbrex	a	100,000	6,372	<0,0001	0,999
		b	0,930	3,290	0,7887	
		x0	44,378	4,946	0,0003	
	Epoxion+Imbrex	a	100,000	12,495	0,0005	0,992
		b	1,434	1,836	0,4702	
		x0	44,325	1,959	<0,0001	
Waba14F	UK	a	100,000	10,754	<0,0001	0,968
		b	5,268	1,403	0,0095	
		x0	40,777	1,950	<0,0001	
	Bravo	a	100,000	8,525	<0,0001	0,985
		b	3,993	0,724	0,0015	
		x0	46,204	1,161	<0,0001	
	Epoxion	a	100,000	10,852	<0,0001	0,980
		b	4,525	0,974	0,0035	
		x0	45,466	1,612	<0,0001	
	Imbrex	a	100,000	7,592	<0,0001	0,987
		b	2,520	0,806	0,0204	
		x0	48,823	0,596	<0,0001	
	Epoxion+Imbrex	a	100,000	9,148	<0,0001	0,983
		b	3,031	0,808	0,0095	
		x0	48,503	0,880	<0,0001	

Tabelle 41: Bonituren der Befallsstärke (BS) [%] und Befallshäufigkeit (BH) [%] mit Zymoseptoria tritici der nicht überdachten Versuchsglieder des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2013 für die Blattetagen F bis F-2. Leere Felder = keine Daten vorhanden, x = keine Bonitur mehr durchgeführt, da >13 von 20 Blätter abgestorben waren.

Intension F			Boniturdatum		12.06.201	3		17.06.201	~		27.06.2013			04.07.2013		-	11.07.201	3		15.07.20	13
HULU3Kontokinfluence20202020202020102010101018(13)000001000			Blattetage	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	H	F-1	F-2
Biblic bioles 100 001 <	3BCH 32	Kontrolle	n Pflanzen	20	20	20	20	20	18	20	20	14	20	17	7	х	х	х	х	х	х
High 500 <td></td> <th></th> <td>BS [%]</td> <td>0,00</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> <td>0,01</td> <td>0,77</td> <td>0,02</td> <td>0,04</td> <td>1,53</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>			BS [%]	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,77	0,02	0,04	1,53						
Fpotion a Philace (1) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2			BH [%]	0,00	5,00	10,00	0,00	5,00	5,56	0,00	10,00	25,00	10,00	35,29	71,43						
Bibio 000 </td <td></td> <th>Epoxion</th> <td>n Pflanzen</td> <td>20</td> <td>16</td> <td>x</td> <td>х</td> <td>х</td> <td>х</td> <td>х</td> <td>х</td>		Epoxion	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	16	x	х	х	х	х	х
Hi (k) 00 00 00 00 00 00 500 500 500 503			BS [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,33	0,12	0,29						
Induce a Pluace <			BH [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	55,00	55,00	43,75						
Billed 0.00 <		Imbrex	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	20	10	x	x	x	x	х	x
BH31 Gamma BH36 Gam Gam Solution			BS [%]	00'0	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,30	0,77	0,24						
B(H1 %) formule image			BH [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	25,00	25,00	40,00						
	BBCH 39	Kontrolle	n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	20	×	x	x	×	×	x	×
			BS [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,14	0,06							
Hoto 1 For 1 </td <td></td> <th></th> <td>BH [%]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>5,00</td> <td>20,00</td> <td>25,00</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>			BH [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	20,00	25,00							
		Epoxion	n Pflanzen				20	20	19	20	20	13	20	18	x	x	х	×	×	x	x
			BS [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01							
Inducts Inducts $R Hauzen 20 20 20 20 20 16 x $			BH [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,56							
		Imbrex	n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	16	×	x	x	×	×	х	×
			BS [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	0,01	0,00	0,01							
			BH [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	6,25							
	3BCH 49	Kontrolle	n Pflanzen							20	20	19	20	20	15	x	x	×	×	x	×
			BS [%]							0,00	0,00	0,01	0,01	0,06	0,08						
Epoxion n Pflanzen 20 17 19 13 x			BH [%]							0,00	0,00	5,26	5,00	10,00	20,00						
BS [%] Diameter D		Epoxion	n Pflanzen							20	20	17	19	13	×	x	x	×	×	х	×
BH [%] 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 Imbrex n Pflanzen 20 20 16 20 19 x x BS [%] BH [%] 0,00 <td></td> <th></th> <td>BS [%]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0,00</td> <td>00'0</td> <td>00'0</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>			BS [%]							0,00	00'0	00'0	0,00	0,00							
Imbrex n Pflanzen 20 20 16 20 19 x x x x BS [%] 0,00			BH [%]							0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
BS [%] 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,		Imbrex	n Pflanzen							20	20	16	20	19	x	x	х	×	×	х	x
BH [%] 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00			BS [%]							0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
			BH [%]							0,00	00'0	0,00	0,00	0,00							

zur Wirkungsdauer im Jahr 2013 für die Blattetagen F bis F-2. Leere Felder = keine Daten vorhanden, x = keine Bonitur mehr durchgeführt, da >13 von 20 Blätter abgestorben waren. Tabelle 42: Bonituren der Befallsstärke (BS) [%] und Befallshäufigkeit (BH) [%] mit Zymoseptoria tritici der überdachten Versuchsglieder des Halbfreilandversuchs

		Boniturdatum	-	2.06.2013			7.06.201			27.06.2013			07.2013		-	1.07.2013		1	07.2013	
		Blattetage	Ц	F-1	F-2	Ľ.	F-1	F-2	'n	F-1	F-2	Ч	F-1	F-2	í E	F-1	F-2	í.	F-1	F-2
BBCH 32	Kontrolle	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	19	19	7	7	×	×
		BS [%]	0,00	0,00	00'0	00'0	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04	0,01	0,07	0,57	0,02	0,50	2,71	0,10		
		BH [%]	0,00	0,00	00'0	00'0	5,00	5,00	0,00	5,00	15,00	5,00	25,00	83,33	10,53	36,84	57,14	28,57		
	Epoxion	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	10	17	10	×
		BS [%]	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,11	0,02	0,22	1,20	0,18	1,10	
		BH [%]	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	10,00	15,00	15,00	42,11	80,00	23,53	70,00	
	Imbrex	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	15	18	13	×
		BS [%]	0,00	0,00	00'0	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	00'0	0,18	0,04	0,29	0,32	0,20	
		BH[%]	0,00	0,00	00'0	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	00'0	25,00	15,00	33,33	33,33	38,46	
BBCH 39	Kontrolle	n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	17	×
		BS [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,01	0,13	1,69	0,31	1,14	
		BH [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	40,00	10,00	30,00	61,11	30,00	82,35	
	Epoxion	n Pflanzen				20	20	20	20	20	19	20	20	19	20	19	7	16	×	×
		BS [%]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	00'0	0,01	0,01	0,03	0,11		
		BH [%]				00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	00'0	5,00	10,53	28,57	31,25		
	Imbrex	n Pflanzen				20	20	19	20	20	20	20	20	20	20	20	6	17	×	x
		BS [%]				0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	0,03	0,01	0,00	0,26		
		BH[%]				0,00	0,00	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	10,00	10,00	0,00	35,29		
BBCH 49	Kontrolle	n Pflanzen							20	20	20	20	20	20	20	20	17	20	17	x
		BS [%]							0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,07	0,00	0,16	0,01	0,00	0,10	
		BH[%]							0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	20,00	0,00	10,00	5,88	00'0	17,65	
	Epoxion	n Pflanzen							20	20	20	20	20	20	19	18	×	×	x	×
		BS [%]							0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00				
		BH[%]							0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00				
	Imbrex	n Pflanzen							20	20	20	20	20	19	17	16	×	×	x	×
		BS [%]							0,00	0,00	00'0	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00				
		BH [%]							0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00				

		Boniturdatum		12.06.20	13		17.06.2013		6	4.06.2013		7	7.06.2013		9	1.07.2013		0	14.07.2013		08	3.07.2013		117	7.2013
		Blattetage	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F F	-1 F
		n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	20	20	20	20	9	20	20	ю	20	8			
	Kontrolle	BS [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1			
		BH [%]	0,0	0,0	15,0	5,0	15,0	40,0	25,0	80,0	77,8	30,0	80,0	55,0	60,0	80,0	100,0	50,0	65,0	66,7	60,0	75,0			
		n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	20	20	20	20	17	20	20	∞	18	13			
BBCH 32	Epoxion	BS [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1			
		BH [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	20,0	5,6	30,0	25,0	5,0	25,0	25,0	11,8	35,0	40,0	37,5	72,2	53,8			
		n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	18	20	19	17	20	19	16	20	19			
	Imbrex	BS [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2			
		BH [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	10,0	5,3	10,0	10,0	0,0	5,0	10,5	11,8	10,0	10,5	18,8	10,0	15,8			
		n Pflanzen				20	20	20	20	20	19	20	20	14	20	19	12	19	19	ю	19	14			
	Kontrolle	BS [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1			
		BH [%]				0,0	0,0	30,0	10,0	50,0	73,7	15,0	40,0	57,1	35,0	52,6	66,7	21,1	42,1	100,0	52,6	85,7			
		n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	12	20	20	5	20	6			
BBCH 39	Epoxion	BS [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
		BH [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	10,0	0,0	5,0	10,5	0,0	5,0	33,3	0,0	5,0	20,0	0,0	11,1			
		n Pflanzen				20	20	19	20	20	20	20	19	17	20	19	Ξ	19	19	5	18	4			
	Imbrex	BS [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0'0	0,0	0,0	0,0			
		BH [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
		n Pflanzen							20	20	20	20	20	20	20	20	14	19	17	11	17	13			
	Kontrolle	BS [%]							0,0	0,7	0,3	0,0	0,4	0,2	0,1	0,5	0,2	0,1	9,0	1,0	0,1	0,3			
		BH [%]							20,0	85,0	85,0	20,0	65,0	80,0	45,0	80,0	85,7	36,8	58,8	81,8	52,9	100,0			
		n Pflanzen							20	20	20	20	20	20	20	20	17	20	20	7	18	11			
BBCH 49	Epoxion	BS [%]							0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1			
		BH [%]							0,0	10,0	10,0	0,0	10,0	25,0	0,0	25,0	29,4	0,0	30,0	28,6	0,0	63,6			
		n Pflanzen							20	20	19	20	20	19	20	20	20	20	20	6	20	11			
	Imbrex	BS [%]							0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0'0	0,0	0,0	0,0			
		BH[%]							0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0			

Tabelle 43: Bonituren der Befallsstärke (BS) und Befallshäufigkeit (BH) [%] mit *Puccinia triticina* der nicht überdachten Versuchsglieder des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2013 für die Blattetagen F bis F-2. Leere Felder = keine Daten vorhanden.

Tabelle 44: Bonituren der Befallsstärke (BS) und Befallshäufigkeit (BH) [%] mit *Puccinia tritticina* der überdachten Versuchsglieder des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im Jahr 2013 für die Blattetagen F bis F-2. Leere Felder = keine Daten vorhanden.

		Boniturdatum		12.06.201	2	-	7 06 2013		PC	06 2013			2 06 2013		6	07 2013		10	7 2013		80	07 2013		1	7 2013	1
		Blattetage	H	F-1	F-2	í Ei	F-1	F-2	í Es	F-1	F-2	і Ъ	F-1	F-2	E E	F-1	F-2	ы	F-1	F-2	H	F-1	F-2	ы	F-1 F-2	
		n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	16	20	19	=	17	10	
	Kontrolle	BS [%]	0,0	0'0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	1,3	0,1	0,7	1,7	0,1	0,4	1,0	0,2	0,6	1,4	0,4	3,6	3,4	2,9	12,7	
		BH [%]	0,0	0,0	25,0	5,0	25,0	60,0	45,0	85,0	90,0	55,0	90,0	90,0	50,0	90,0	95,0	55,0	95,0 1	30,0	0,0 1	00'0	100,0	100,0	100,0	1
		n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	13	18	15	
BBCH 32	Epoxion	BS [%]	0,0	0'0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,3	0,1	0,0	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,6	3,2	2,2	4,1	12,7	
		BH [%]	0,0	0'0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	85,0	55,0	15,0	90,0	55,0	15,0	0,00	60,0	30,0 1	00,00	58,4 7	0,0	00'0	0,001	100,0	0,001	
		n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	17	1
	Imbrex	BS [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,0	0,3	0,6	0,0	0,5	0,4	0,0	1,0	1,1	0,1	0,9	1,1	0,6	6,1	
		BH [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	45,0	65,0	10,0	55,0	75,0	40,0	85,0	95,0	40,0	85,0	90'0 Ş	5,0	80,0	94,4	80,0	88,2	
		n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	17	20	16	
	Kontrolle	BS [%]				0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,5	0,1	0,8	0,5	0,1	0,6	0,5	0,2	1,0	0,8	0,6	4,6	6,0	6,0	24,8	
		BH [%]				0,0	15,0	20,0	35,0	100,0	90,0	40,0	90,0	100,0	50,0	90,0	0,00	55,0 1	00'0	94,7 9	0,0	00'0	100,0	100,0	100,0	
		n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	20	13	20	16	
BBCH 39	Epoxion	BS [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,7	0,0	0,1	0,7	0,0	0,6	0,9	0,0	1,2	2,5	0,4	5,4	
		BH [%]				0,0	0,0	0,0	5,0	30,0	65,0	5,0	35,0	70,0	10,0	65,0	85,0	15,0	60,0	88,9 3	5,0	95,0	100,0	100,0	0,001	1
		n Pflanzen				20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	20	20	20	14	20	17	
	Imbrex	BS [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,5	0,0	0,4	
		BH [%]				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	75,0	0,0	15,0	75,0	0,0	20,0	63,2	0,0	30,0	75,0	0,0	35,0	85,7	5,0	52,9	1
		n Pflanzen							20	20	19	20	20	19	20	20	19	20	20	15	20	19	10	14	=	
	Kontrolle	BS [%]							0,0	0,3	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	0,1	2,1	4,4	3,4	13,0	
		BH [%]							20,0	85,0	84,2	20,0	85,0	94,7	35,0	95,0	94,7	35,0	85,0	86,7 8	0,0	00'0	0,001	100,0	6'06	1
		n Pflanzen							20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	12	19	12	
BBCH 49	Epoxion	BS [%]							0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,7	0,0	3,0	
		BH [%]							0,0	0,0	5,0	0,0	15,0	65,0	0,0	15,0	55,0	0,0	20,0	58,4 2	0,0	50,0	83,3	42,1	0,001	1
		n Pflanzen							20	20	20	20	20	19	20	20	20	20	20	20	20	20	16	19	12	
	Imbrex	BS [%]							0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0'0	0,4	0,0	0,0	
		BH [%]							0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	15,8	0,0	10,0	20,0	0,0	10,0	25,0	5,0	10,0	56,3	0,0	8,3	

im Jahr 2014 für die Blattetagen F bis F-2. Leere Felder = keine Daten vorhanden, x = keine Bonitur mehr durchgeführt, da >13 von 20 Blätter abreetorben waren Tabelle 45: Bonituren der Befallshäufigkeit (BH) [%] mit Zymoseptoria tritici der nicht überdachten Versuchsglieder des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer

		Boniturdatum	0)8.05.201 4	4		(3.05.2014		Ä	0.05.2014		7	7.05.2014		03	06.2014		H	0.06.2014	_		18.06.2014	
		Blattetage	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2	F	F-1	F-2
BBCH 39	Kontrolle	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	18	20	18	16	20	15	13	20	10	15
		BH [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	20,00	6,67
	Epoxion	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	20	20	17	19	17	15	15	10	x
		BH [%]	0,00	00'0	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	6,67	10,00	
	Imbrex	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	18	18	18	15	15	13	12	12	6	×	x	x	х
		BH [%]	00'0	00'0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	0,00	0,00	0,00				
BBCH 49	Kontrolle	n Pflanzen																					
		BH [%]																					
	Epoxion	n Pflanzen																					
		BH [%]																					
	Imbrex	n Pflanzen																					
		BH [%]																					

Jahr 2014 für die Blattetagen F bis F-2. Leere Felder = keine Daten vorhanden, x = keine Bonitur mehr durchgeführt, da >13 von 20 Blätter abgestorben Tabelle 46: Bonituren der Befallshäufigkeit (BH) [%] mit Zymoseptoria tritici der überdachten Versuchsglieder des Halbfreilandversuchs zur Wirkungsdauer im waren

		Boniturdatum	0	8.05.2014		1	3.05.2014		3	0.05.2014		7	7.05.2014		ö	3.06.2014		1	0.06.2014			18.06.201	_
		Blattetage	í.	F-1	F-2	н	F-1	F-2	ы	F-1	F-2	ы	F-1	F-2	í.	F-1	F-2	ы	F-1	F-2	Ł	F-1	F-2
BBCH 39	Kontrolle	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	15	19	17	12	16	14	5
		BH [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14	20,00
	Epoxion	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20	17	20	20	17	17	16	14	13	Π	7
		BH [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	00'0	14,28
	Imbrex	n Pflanzen	20	20	20	20	20	20	19	20	17	17	16	14	15	12	10	11	6	x	x	×	x
		BH [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BBCH 49	Kontrolle	n Pflanzen																					
		BH [%]																					
	Epoxion	n Pflanzen																					
		BH [%]																					
	Imbrex	n Pflanzen																					
		BH [%]																					

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Andreas von Tiedemann für die Betreuung meiner Arbeit und die stets schnelle Beantwortung meiner Fragen. Herrn Prof. Prof. Dr. Bernd Freier danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Allen Mitarbeitern der ZEPP sage ich Danke für die stete Hilfsbereitschaft und die vielen Anregungen. Insbesondere danke ich Cornelia Braun und Jaqueline Hornung für die hervorragende technische Assistenz und Dr. Benno Kleinhenz für die Überlassung des Themas und das gewährte große Maß an Selbstständigkeit bei der Ausarbeitung der Projektinhalte. Ein ganz besonderer Dank gilt Dr. Paolo Racca und Dr. Jeanette Jung für die ausgezeichnete Betreuung und die Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit, für die Aufmunterungen und die stete Diskussionsbereitschaft. Claudia Tebbe danke ich für die moralische Unterstützung, die kritische Durchsicht und die vielen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ferner gilt mein Dank der Abteilung Landwirtschaft am Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, insbesondere Herrn Bernd Lenhart sowie allen Mitarbeitern des Labors für die große Hilfsbereitschaft und die freundliche Atmosphäre während meiner Promotionszeit. Ebenso danke ich den vielen Praktikanten, ohne die die umfangreichen Feldversuche nicht möglich gewesen wären.

Außerdem danke ich der Firma BASF, insbesondere Herrn Dr. Jens Marr, für die Kostenübernahme und damit die Ermöglichung der für diese Arbeit wichtigen Wirkstoffanalysen.

Besonderer Dank gilt auch den Pflanzenschutzdiensten der Länder für die tatkräftige Unterstützung und Hilfsbereitschaft sowie für das Anlegen der vielen Validierungsversuche. Außerdem bedanke ich mich beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, das diese Arbeit im Rahmen eines Innovationsprojektes finanziell ermöglicht hat.

Zum Schluss möchte ich Julia Recker und meinem Vater für das Korrekturlesen danken. Meinem Bruder Ingo danke ich für die technische Unterstützung, auf die ich jederzeit zurückgreifen konnte. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinem Mann Pascal für die liebevolle Unterstützung während all der Jahre.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass diese Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt wurde.

Wöllstein, den 11.12.2014