

**Untersuchungen zum Auftreten und der Interaktion
von Zuckerrüben-Blattkrankheiten
am Beispiel von Cercospora-Blattflecken (*Cercospora beticola*), Rübenmehltau
(*Erysiphe betae*) und Rübenrost (*Uromyces betae*)
unter dem Einfluss des Klimawandels**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität
Hannover

zur Erlangung des Grades
Doktorin der Gartenbauwissenschaften
Dr. rer. hort.

genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. agr. Dominique Richerzhagen
geboren am 18.11.1982 in Köln

2013

Referent: Prof. Dr. Bernhard Hau

Korreferent: Prof. Dr. Andreas von Tiedemann

Tag der Promotion: 26.03.2013

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Interaktion der drei Zuckerrüben-Blattkrankheiten Cercospora-Blattflecken (C) (*Cercospora beticola*), Mehltau (M) (*Erysiphe betae*) und Rost (R) (*Uromyces betae*) untersucht. Die Studie beruht auf zwei Säulen. Die erste umfasst die Monitoringdaten-Analyse von 175 Standort-Sorten-Jahren, deren Ergebnisse zeigen, dass Cercospora heute nicht nur in 73,7 % der Fälle über Mehltau und Rost dominiert, sondern auch in 85,7 % als erste Blattkrankheit in den Beständen auftritt.

Die zweite Säule beruht auf Klimaschrankversuchen der beiden Wärme liebenden Krankheiten Cercospora und Mehltau. Neben der unabhängigen Einzelbetrachtung der Blattkrankheiten bei drei Temperaturstufen (15, 20 und 25 °C) erfolgte die Bewertung der Interaktion im Temperaturoptimum (25 °C) für drei Krankheitsreihenfolgen, die sich im Inokulationszeitpunkt der beiden Krankheiten unterschieden, nämlich beide Krankheiten gleichzeitig inokuliert (C=M), C vor M (1C2M) und M vor C (1M2C). Als Erhebungsmerkmal zur Beschreibung des Krankheitsverlaufs dienten Befallshäufigkeit und Befallsstärke. Darauf aufbauend wurde mit einer logistischen Anpassung der Einfluss der Temperatursteigerung auf die unabhängigen Befallsverläufe analysiert. Die Erhöhung wirkte sich bei der Befallshäufigkeit tendenziell positiv auf die Wachstumsrate, bei der Befallsstärke auf das maximale Befallsniveau aus.

Die Befallsverläufe in den Interaktionsvarianten wurden mit Hilfe eines modifizierten Lotka-Volterra-Modells beschrieben, wobei die Anpassungsgüte auf Basis der Befallshäufigkeit höher war als die der Befallsstärke. Unabhängig von der Reihenfolge der beiden Krankheiten dominierte Cercospora in der Interaktion über Mehltau, was die statistische Analyse der Konkurrenzkoefizienten und der standardisierten Flächen unter den Befallskurven bestätigte. Mehltau hatte nur in der Variante, in der er zuerst inokuliert wurde (1M2C), einen Entwicklungsvorsprung, den er aber im Laufe der Zeit an Cercospora verlor. Aus populationsökologischer Sicht kann deshalb von einem *Amensalismus* (ein Interaktionspartner wird negativ beeinflusst, der andere bleibt unbeeinflusst) oder einer *indirekten einseitigen Konkurrenz* gesprochen werden. In wenigen Fällen wurde sogar ein signifikanter Förderungseffekt von Mehltau auf Cercospora beobachtet.

Aufbauend auf den Interaktionsmodellen der Befallshäufigkeit dienten zwei der fünf Versuchsdurchgänge als Basis für eine Szenarien-Analyse zur Folgenabschätzung der Klimaerwärmung. Damit Mehltau eine Chance gegenüber Cercospora erhielt, wurde je nach Ausgangssituation ein Funktionsparameter in drei Stufen erhöht oder reduziert (10, 20 und 50 %). Die Berechnungen ergaben, dass sich Mehltau nicht aus eigener Kraft in der Interaktion durchsetzen

kann, sondern mindestens eine Halbierung der Wachstumsrate von *Cercospora* vorliegen muss, damit Mehltau einen Vorsprung in der Etablierungsphase erhält.

Gegen eine Schwächung von *Cercospora*, wie sie in der Szenarien-Analyse simuliert wurde, sprechen jedoch zwei Erkenntnisse dieser Arbeit: erstens die Ratensteigerung bei der unabhängigen Einzelbetrachtung der Blattkrankheiten unter der Annahme einer Temperaturerhöhung und zweitens die verbesserten Infektionsbedingungen für *Cercospora*. Eine Verknüpfung von Pilzentwicklung (Literaturdaten) und simuliertem Temperaturanstieg von bis zu 3,5 °C (bis zum Jahr 2100), für die wichtigen Monate des Krankheitsauftretens, ergab, dass *Cercospora* ihr Optimum der Infektionswahrscheinlichkeit anstrebt, bei Mehltau hingegen das Optimum leicht überschritten ist und ein Rückgang unter diesen Bedingungen zu verzeichnen wäre. Dies lässt die Aussage zu, dass sich bei gleich bleibenden Anbaubedingungen das Interaktionsverhältnis in Zukunft stärker zu Gunsten von *Cercospora* verändern wird als umgekehrt.

Die Bedeutung von Rost wird im Gegensatz dazu weiter abnehmen, da er auf Grund seines niedrigen Temperaturoptimums bei einer Klimaerwärmung in der Entwicklung benachteiligt sein wird. Dieser Rückschritt wurde ebenfalls durch die Verwendung eines theoretischen Interaktionsmodells mit drei Blattkrankheiten bestätigt.

Schlagwörter: Zuckerrüben-Blattkrankheiten, Interaktion, Lotka-Volterra-Modell, Klimawandel

Abstract

In this study the interaction of the three sugar beet leaf diseases Cercospora leaf spot (C) (*Cercospora beticola*), powdery mildew (M) (*Erysiphe betae*) and beet rust (R) (*Uromyces betae*) was analyzed. The work is based on two pillars. The first one includes the analysis of field data of 175 location-variety-years, showing that today Cercospora dominates in 73.7 % of the cases over powdery mildew and rust and, moreover, is in 85.7 % the first leaf disease which occurs in the field.

The second pillar is based on climate chamber experiments of the two heat-preferring leaf diseases Cercospora leaf spot and powdery mildew. In addition to the independent assessment of the foliar diseases at three temperature levels (15, 20 and 25 °C), the interaction between Cercospora and powdery mildew was evaluated for three different disease sequences at the optimum of temperature (25 °C). The disease sequence was defined by the order of the inoculation, i.e. both diseases inoculated at the same time (C=M), C before M (1C2M) and M before C (1M2C). To describe the disease progress, the disease incidence and the severity were used. Based on these characteristics, the influence of an increasing temperature on the independent progress curves was analyzed by a logistic function. The increase in temperature resulted in higher growth rates of the disease incidence and increased maximum level of the severity.

The disease progress curves in interaction were described by a modified Lotka-Volterra-model; the goodness of fit was higher for the disease incidence than for the disease severity. Independent of the disease sequence, Cercospora dominated in all cases over powdery mildew, verified by the statistical analysis of the competition coefficients and the values of the standardized area under the disease progress curve. Powdery mildew had a leading position at the beginning of the observation period only when it was pre-inoculated in 1M2C, but at the end Cercospora leaf spot reached again a higher disease level. From the perspective of population ecology, the relationship could be described as *amensalism* (one partner is negatively affected, the other unaffected) or *indirectly one-sided competition*. In a few trials, powdery mildew had a significant promoting effect on Cercospora leaf spot.

Based on the interaction models of disease incidence, two of the five trial runs were used as a basis for scenario analysis on the impact of global warming. To assess the possibility of powdery mildew to get the important role, each function parameter was increased or reduced in three stages (10, 20 and 50%) depending on the initial situation. The calculations showed that powdery mildew could not improve its position in the interaction with its own power, but only when the halving of the Cercospora growth rate allowed a head start in the establishment phase of powdery mildew.

However, there are two reasons denying a weakening of Cercospora as simulated in the scenario analysis. Firstly, the rates in the independent assessment of both foliar diseases increased with rising

temperature, and secondly, the infection conditions for *Cercospora* improved. A combination of fungal development (literature data) and simulated temperature rise of up to 3.5 °C (until 2100) showed that *Cercospora* achieved their optimum of infection probability for the important months of disease occurrence. In contrast, powdery mildew exceeded slightly its optimum and would decrease by an increase of temperature. This leads to the conclusion that under the same growing conditions, the interaction between both leaf diseases will change more in favor of *Cercospora* than vice versa in the future.

As opposed to *Cercospora* and powdery mildew, the importance of rust will continue to decline, because its low temperature optimum will disadvantage the disease progression in a warming climate. This conclusion was also confirmed by the use of a theoretical interaction model with three leaf diseases.

Keywords: sugar beet leaf diseases, interaction, Lotka-Volterra model, climate change

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	7
II.	Abkürzungsverzeichnis.....	10
1	Einleitung	14
2	Stand des Wissens	18
2.1	Die ökologischen Nischen der Blattkrankheiten Cercospora, Mehltau und Rost	18
2.2	Die Definition von Interaktionsverhältnissen	21
2.3	Die Interaktionsverhältnisse bei landwirtschaftlich bedeutender Schaderreger	23
2.4	Die Interaktionsverhältnisse bei Blattkrankheiten an Zuckerrüben.....	24
2.5	Die mathematische Beschreibung von Interaktionen (Das Lotka-Volterra Modell)	25
2.6	Der Anspruch der Blattkrankheiten an das Klima	28
2.7	Der Klimawandel in Deutschland.....	30
2.8	Der Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von Zuckerrüben-Blattkrankheiten in Deutschland	31
3	Material & Methode.....	33
3.1	Die Felddatenanalyse.....	33
3.1.1	Die Beschreibung der Felddaten	33
3.1.2	Die Auswertung der Felddaten.....	34
3.1.3	Die Analyse der Befallshäufigkeit	35
3.1.4	Die Analyse der Befallsstärke	37
3.2	Die Durchführung und Analyse der Klimaschrankversuche.....	38
3.2.1	Die Sortenwahl und Anzucht der Jungpflanzen	38
3.2.2	Die Beschreibung der Klimaschrankversuche	38
3.2.2.1	Der Versuchsaufbau	39
3.2.2.2	Die Inokulationsmethode der beiden Blattkrankheiten.....	41
3.2.3	Die Erhebung und Verrechnung der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke	42
3.2.4	Die Untersuchung zum Einfluss eines einmaligen Regenereignisses auf den Befallsverlauf des Rübenmehltaus zur Simulation einer Sprühinokulation.....	43
3.3	Die Auswertung der Feld- und Klimaschrankdaten.....	44
3.3.1	Die Beschreibung der logistischen Anpassung der gewonnenen Daten aus dem Klimaschrankversuch und der Felddaten	44
3.3.2	Die Sortierung der Felddaten für Vergleichbarkeit mit Klimaschrankdaten	45
3.3.3	Die Berechnung des <i>sAUDPC</i> -Wertes.....	45
3.3.4	Die Berechnung der täglichen Wachstumsrate.....	46
3.4	Die Parameterschätzung	47
3.4.1	Der Aufbau der Interaktionsmodelle	47
3.4.2	Die statistische Auswertung	50
3.4.3	Die Vergleichsanalyse des Interaktionsmodells	50
3.4.4	Die Szenarien-Analyse des Interaktionsmodells unter Annahme einer Klimaerwärmung	51
3.4.5	Das theoretische Interaktionsmodell mit drei Blattkrankheiten	53
4	Ergebnisse	55
4.1	Die Ergebnisse der Felddatenanalyse	55
4.1.1	Die Analyse der Befallshäufigkeit	55
4.1.1.1	Die Häufigkeit der einzelnen Krankheiten in den Solo- und Kombinationsvarianten....	55
4.1.1.2	Die zeitliche Reihenfolge der drei Blattkrankheiten	56

4.1.1.3	Die exemplarischen Verläufe der Befallshäufigkeit der Felddaten	57
4.1.2	Die Analyse der Befallsstärke	60
4.1.2.1	Die Verteilung der Blattkrankheiten in verschiedenen Befallsstärkeklassen.....	60
4.1.2.2	Die exemplarischen Verläufe der Befallsstärke der Felddaten	63
4.1.2.3	Die <i>sAUDPC</i> -Werte der Felddaten.....	66
4.1.2.4	Die tägliche Wachstumsrate der Befallshäufigkeiten der Felddaten.....	67
4.1.2.5	Die tägliche Wachstumsrate der Befallsstärke der Felddaten	68
4.2	Die Ergebnisse der Klimaschrankversuche	70
4.2.1	Die Analyse der Befallshäufigkeiten.....	70
4.2.1.1	Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für <i>Cercospora</i> in den Solo-Varianten	70
4.2.1.2	Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für Mehltau in den Solo-Varianten.....	73
4.2.1.3	Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für <i>Cercospora</i> in den Duo-Varianten	75
4.2.1.4	Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für Mehltau in den Duo-Varianten	78
4.2.2	Die Analyse der Befallsstärken	81
4.2.2.1	Die Entwicklung der Befallsstärke für <i>Cercospora</i> in den Solo-Varianten	81
4.2.2.2	Die Entwicklung der Befallsstärke für Mehltau in den Solo-Varianten.....	84
4.2.2.3	Die Entwicklung der Befallsstärke von <i>Cercospora</i> in den Duo-Varianten	87
4.2.2.4	Die Entwicklung der Befallsstärke von Mehltau in den Duo-Varianten	89
4.2.3	Die Analyse der Inkubationszeiten.....	93
4.2.3.1	Die festgestellte Inkubationszeit für <i>Cercospora</i> im Vergleich zu Literaturdaten	93
4.2.3.2	Die festgestellte Inkubationszeit für Mehltau im Vergleich zu Literaturdaten.....	94
4.2.4	Der Vergleich <i>Cercospora</i> - und Mehltau epidemien.....	95
4.2.4.1	Die Solo-Varianten beider Krankheiten.....	95
4.2.4.2	Die Interaktionsvarianten beider Krankheiten.....	96
4.2.4.3	Die Gegenüberstellung Solo- und Interaktionsvarianten.....	98
4.2.5	Die <i>sAUDPC</i> -Werte der Klimaschrankversuche.....	99
4.2.6	Die tägliche Wachstumsrate der Befallshäufigkeiten für die Blattkrankheiten in den Klimaschrankversuchen.....	100
4.2.7	Die tägliche Wachstumsrate der Befallsstärke für die Blattkrankheiten in den Klimaschrankversuchen.....	101
4.2.8	Das Ergebnisse zum Einfluss eines einmaligen Regenereignisses zur Simulation einer Sprühinokulation auf den Befallsverlauf des Rübenmehltaus	102
4.3	Der Vergleich der Feld- und Klimaschrankergebnisse	107
4.3.1	Der Vergleich der <i>sAUDPC</i> -Werte	107
4.3.2	Der Vergleich der täglichen Wachstumsraten für Befallshäufigkeit und Befallsstärke	109
4.4	Die Modellierung der Interaktion der zwei Blattkrankheiten.....	111
4.4.1	Die Interaktionsmodelle auf Basis der Befallshäufigkeit.....	111
4.4.1.1	Das Interaktionsmodell für die Variante C=M.....	111
4.4.1.2	Das Interaktionsmodell für die Variante 1C2M.....	115
4.4.1.3	Das Interaktionsmodell für die Variante 1M2C.....	119
4.4.1.4	Der statistische Vergleich der Varianten und Versuchsdurchgänge in den Interaktionsvarianten anhand der Befallshäufigkeit.....	122
4.4.1.5	Der statistische Vergleich zwischen <i>Cercospora</i> und Mehltau in den Interaktionsvarianten anhand der Befallshäufigkeit.....	124
4.4.2	Die Interaktionsmodelle auf Basis der Befallsstärke	126
4.4.2.1	Das Interaktionsmodell für die Variante C=M.....	126
4.4.2.2	Das Interaktionsmodell für die Variante 1C2M.....	130
4.4.2.3	Das Interaktionsmodell für die Variante 1M2C.....	133
4.4.2.4	Der statistische Vergleich der Varianten und Versuchsdurchgänge in den Interaktionsvarianten anhand der Befallsstärke	136

4.4.2.5	Der statistische Vergleich zwischen Cercospora und Mehltau in den Interaktionsvarianten anhand der Befallsstärke	139
4.4.3	Der Vergleich von klassischem und modifiziertem Lotka-Volterra-Modell	141
4.4.3.1	Die Vergleichsanalyse bei gleichzeitiger Inokulation beider Krankheiten (C=M).....	141
4.4.3.2	Die Vergleichsanalyse bei Erstinokulation von Cercospora (1C2M)	145
4.4.3.3	Die Vergleichsanalyse bei Erstinokulation von Mehltau (1M2C)	150
4.5	Die Szenarien-Analyse der Befallssituation in den Interaktionsvarianten unter Annahme einer Klimaerwärmung	151
4.5.1	Die Variante C=M	151
4.5.2	Die Variante 1C2M	157
4.5.3	Die Variante 1M2C	164
4.5.4	Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien-Analyse	170
4.5.5	Betrachtung der Pilzentwicklung unter der Annahme einer Klimaerwärmung und Verknüpfung der Erkenntnis mit den Ergebnissen der Szenarien-Analyse.....	171
4.6	Das theoretische Interaktionsmodell mit drei Blattkrankheiten	173
5	Diskussion	175
5.1	Der Ansatz und die Methodik.....	175
5.1.1	Die Felddatenanalyse	176
5.1.2	Die Klimaschrankversuche.....	176
5.2	Das Interaktionsverhältnis zwischen Cercospora-Blattflecken und Mehltau in der Duo-Variante	178
5.2.1	Die Bewertung des modifizierte LV-Modells.....	181
5.2.2	Die Problematik der Befallsstärke und die Vorteile der Verwendung der Befallshäufigkeit	183
5.3	Der Vergleich der Feld- Klimaschrankbedingungen	187
5.4	Der Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten und die Interaktion von Cercospora-Blattflecken und Mehltau	189
5.5	Die Bewertung der Szenarien-Analyse für das Auftreten und die Interaktion der Zuckerrübenblattkrankheiten	192
5.6	Die Bewertung des Interaktionsmodells mit drei Blattkrankheiten.....	196
5.7	Fazit und Ausblick.....	197
III.	Literaturverzeichnis	200
IV.	Anhang	205

II. Abkürzungsverzeichnis

Allgemein

1C2M	= Interaktionsvariante mit der Inokulationsreihenfolge erst Cercospora dann Mehltau
1C2M3R	= Interaktionsvariante mit der Inokulationsreihenfolge erstens Cercospora, zweitens Mehltau und drittens Rost
1C2R3M	= Interaktionsvariante mit der Inokulationsreihenfolge erstens Cercospora, zweitens Rost und drittens Mehltau
1C2MR	= Interaktionsvariante mit der Inokulationsreihenfolge erstens Cercospora und dann Mehltau und Rost gleichzeitig
1M2C	= Interaktionsvariante mit der Inokulationsreihenfolge erst Mehltau dann Cercospora
AUDPC	= Area under disease progress curve
AS	= Ausgangssituation
BH	= Befallshäufigkeit in (%)
BH _{max}	= maximale Befallshäufigkeit in (%)
BH _{min}	= minimale Befallshäufigkeit in (%)
BS	= Befallsstärke in (%)
BSA	= Bundessortenamt, Hannover
C	= Cercospora-Blattflecken (<i>Cercospora beticola</i>)
C=M	= Interaktionsvariante mit gleichzeitigem Inokulationstermin von Cercospora und Mehltau
CERC BET	= Modell zur Prognose des Erstauftretens und dem Behandlungstermin von Cercospora-Blattflecken
CERC BET1	= Teilmodell aus CERC BET, welches das Erstauftreten von Cercospora-Blattflecken prognostiziert
C_Duo	= Cercospora in der Interaktionsvariante mit Mehltau
C Feld_Duo	= Cercospora in einer Duo-Variante aus dem Feld-Datensatz
C KS_Duo	= Cercospora in einer Duo-Variante aus dem Klimaschrank-Datensatz
C KS_Solo	= Cercospora in einer Solo-Variante aus dem Klimaschrank-Datensatz
C _{max}	= maximal festgestellter Befallsverlauf für Cercospora
C _{min}	= minimal festgestellter Befallsverlauf für Cercospora
C_Solo	= Cercospora in der Solo-Variante
DP	= Datenpunkt
Duo CM	= Blätter mit Cercospora und Mehltau befallen
Duo CR	= Blätter mit Cercospora und Rost befallen
Duo MR	= Blätter mit Mehltau und Rost befallen
Duo-Variante	= zwei Krankheiten gleichzeitig auf einem Blatt
DWD	= Deutscher Wetterdienst
ERY BET	= Modell zur Prognose des Erstauftretens und dem Behandlungstermin von Rübenmehltau
IfZ	= Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen
KS	= Klimaschrank
KT	= Kalendertage
log. Anp.	= logistische Anpassung

LV-Modell	= Lotka-Volterra Modell
n	= Anzahl
M	= Rübenmehltau (<i>Erysiphe betae</i>)
Mai_2012	= Versuchsdurchgang von Mai 2012
M_Duo	= Mehltau in der Interaktionsvariante mit Cercospora
M Feld_Duo	= Mehltau in einer Duo-Variante aus dem Feld-Datensatz
M KS_Duo	= Mehltau in einer Duo-Variante aus dem Klimaschrank-Datensatz
M KS_Solo	= Mehltau in einer Solo-Variante aus dem Klimaschrank-Datensatz
Mmax	= maximal festgestellter Befallsverlauf für Mehltau
Mmin	= minimal festgestellter Befallsverlauf für Mehltau
Mrz_2012	= Versuchsdurchgang von März 2012
MSM	= Model mean square
M_Solo	= Mehltau in der Solo-Variante
MSR	= Residual mean square
Nov_2011	= Versuchsdurchgang von November 2011
p	= P-Wert
p. a.	= per anno
R	= Rübenrost (<i>Uromyces betae</i>)
R ²	= Bestimmtheitsmaß
RAMUBET	= Modell zur Prognose des Erstauftretens und dem Behandlungstermin von Ramularia-Blattflecken
RH	= relative Luftfeuchte in (%)
Rmax	= maximal festgestellter Befallsverlauf für Rost
Rmin	= minimal festgestellter Befallsverlauf für Rost
S	= Blatt- und Spelzenbräune (<i>Septoria nodorum</i>)
sAUDPC	= mittlerer oder standardisierte AUDPC-Wert
SE	= Standardfehler
SD	= Standardabweichung
Sept_2011	= Versuchsdurchgang von September 2011
Solo C	= Blätter ausschließlich mit Cercospora befallen
Solo M	= Blätter ausschließlich mit Mehltau befallen
Solo R	= Blätter ausschließlich mit Rost befallen
Solo-Variante	= nur eine Krankheit befindet sich auf dem Blatt
t	= Zeit in Tagen
T	= Temperatur in (°C)
Trio CMR	= Blätter mit Cercospora, Mehltau und Rost befallen
Trio-Variante	= drei Krankheiten befinden sich auf einem Blatt
UROBET	= Modell zur Prognose des Erstauftretens und dem Behandlungstermin von Rübenrost
WSS	= Weighted sum of square
$\bar{x}$	= arithmetisches Mittel
$\bar{x}_{25}$	= arithmetisches Mittel für den jeweiligen Parameter bei 25 °C
ZEPP	= Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programm im Pflanzenschutz, Bad Kreuznach
ZR	= Zuckerrübe

Einheiten

1/Tag	= pro Tag
°C	= Temperatur in Grad Celsius
d	= Tag
ha	= Hektar
l	= Liter
ml	= Milliliter
mm	= Millimeter
%	= Prozent
%/Tag	= Prozent pro Tag

Parameter

α_{12}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss der Art 2 auf die Art 1
α_{CM}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Mehltau auf Cercospora
α_{CR}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Cercospora auf Rost
α_{MC}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Cercospora auf Mehltau
α_{MR}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Rost auf Mehltau
α_{MS}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Septoria auf Mehltau
α_{RC}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Cercospora auf die Rost
α_{RM}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Mehltau auf Rost
α_{SM}	= Konkurrenzkoeffizient, Einfluss Mehltau auf Septoria
CO_{Duo}	= Anfangsbefall von Cercospora in der Duo-Variante in (%)
CO_{Solo}	= Anfangsbefall von Cercospora in der Solo-Variante in (%)
$CO_{Solo_{max}}$	= oberer Grenzwert für den Anfangsbefall von Cercospora in der Solo-Variante in (%)
$CO_{Solo_{min}}$	= unterer Grenzwert für den Anfangsbefall von Cercospora in der Solo-Variante in (%)
IA_1	= Inokulationsabstand von Art 1 in Tagen
IA_C	= Inokulationsabstand von Cercospora in Tagen
IA_M	= Inokulationsabstand von Mehltau in Tagen
IA_R	= Inokulationsabstand von Rost in Tagen
MO_{Duo}	= Anfangsbefall von Mehltau in der Duo-Variante in (%)
MO_{Solo}	= Anfangsbefall von Mehltau in der Solo-Variante in (%)
$MODuo_{max}$	= oberer Grenzwert für den Anfangsbefall von Mehltau in der Duo-Variante in (%)
$MODuo_{min}$	= unterer Grenzwert für den Anfangsbefall von Mehltau in der Duo-Variante in (%)
K_1	= Kapazität der Art 1 oder maximales Befallsniveau der Art 1 in (%)
K_C	= Kapazität von Cercospora in (%)
K_M	= Kapazität von Mehltau in (%)
K_{max}	= oberer Grenzwert der Kapazität in (%)
K_{min}	= unterer Grenzwert der Kapazität in (%)
K_R	= Kapazität von Rost in (%)
K_S	= Kapazität von Septoria in (%)
r	= tägliche Wachstumsrate
RO_{Duo}	= Anfangsbefall von Rost in der Duo-Variante in (%)
RO_{Solo}	= Anfangsbefall von Rost in der Solo-Variante in (%)
r_L	= logistische Wachstumsrate
r_1	= Wachstumsrate der Art 1 in (1/Tag)

r_C	= Wachstumsrate von Cercospora in (1/Tag)
$r_1 K_1$	= Produkt aus Wachstumsrate und Kapazität von Art 1 in (%/Tag)
r_{max}	= oberer Grenzwert der Wachstumsrate in (1/Tag)
r_M	= Wachstumsrate von Mehltau in (1/Tag)
r_{min}	= unterer Grenzwert der Wachstumsrate in (1/Tag)
r_R	= Wachstumsrate von Rost in (1/Tag)
r_S	= Wachstumsrate von Septoria in (1/Tag)
yO_{Duo}	= Anfangsbefall von Art 1 in der Duo-Variante in (%)
yO_{Solo}	= Anfangsbefall von Art 1 in der Solo-Variante in (%)
y_0	= Populationsgröße zum Zeitpunkt 0 in (%)
y_1	= Populationsgröße der Art 1 in (%)
y_C	= Populationsgröße von Cercospora in (%)
y_M	= Populationsgröße von Mehltau in (%)
y_R	= Populationsgröße von Rost in (%)
y_S	= Populationsgröße von Septoria in (%)

1 Einleitung

In Deutschland wurden im Jahr 2011 auf einer Fläche von mehr als 394.000 ha Zuckerrüben angebaut. Dies entspricht einem Anteil von 3 % an der gesamten deutschen Ackerfläche und bringt Deutschland innerhalb der EU eine Führungsposition in der Zuckerrübenproduktion ein. Im Durchschnitt der Jahre 2009 bis 2011 wurde ein Zuckerrübenenertrag von 69,9 t/ha bzw. ein Zuckerertrag von 11,1 t/ha erreicht (ANONYMUS, 2011). Das Zuckerertragsniveau in Deutschland hat sich von 1981 bis 2005 um 1,16 % p. a. erhöht (FUCHS ET AL., 2008). Durch gezieltes Anbaumanagement kann dieses Ertragsniveau stabil gehalten bzw. weiter gesteigert werden. Ein Hauptelement ist dabei die Erhaltung und Förderung eines gesunden Blattapparates. Dieser kann während der Saison durch abiotische und biotische Stressfaktoren in seiner Entwicklung gestört werden. Zu den abiotischen Faktoren gehören hauptsächlich die Nährstoffversorgung und die Wasserzufuhr. Bei den biotischen Stressoren wird der Blattapparat, neben Schädlingen, Bakterien und Virose, insbesondere von pilzlichen Schaderregern besiedelt, geschwächt und zerstört.

Die weltweit wichtigste Blattkrankheit an Zuckerrüben ist die *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit (*Cercospora beticola*). Bei einer starken Epidemie sind Verluste im Zuckerertrag von bis zu 50 % möglich (KAISER, 2007; UPHOFF, 2011). Ursächlich ist hierbei, dass der durch *Cercospora* zerstörte Blattapparat einen kontinuierlichen Blattneuaustrieb auslöst. Somit fließen schon eingelagerte Reservestoffe in die Bildung neuer Blätter. Die verbrauchten Nährstoffe fehlen dann zur Ernte im Rübenkörper und mindern die Qualität (UPHOFF, 2011). Des Weiteren kommen eine reduzierte Assimilationsfläche und schlechte Köpfqualität hinzu.

Die zweitwichtigste Krankheit an Zuckerrüben ist der Rübenmehltau (*Erysiphe betae*). Er kann Ertragsverluste von bis zu 30 % verursachen (WELTZIEN & AHRENS, 1977). Stark infiziertes Gewebe neigt zur Bildung von Chlorosen und zum frühzeitigen Einsetzen der Seneszenz (FRANCIS, 2002). Die Assimilation ist demzufolge gestört und durch das Absterben der Blätter wird die Bildung neuer Herzblätter angeregt, die, wie bei *Cercospora*, die Reservestoffe in der Zuckerrübe reduzieren. Außerdem wird die Schließfähigkeit der Stomata beeinträchtigt, wodurch die Transpirationsrate erhöht wird (LENZ, 2002).

Weitere pilzliche Krankheiten, die in Zuckerrüben auftreten können, sind Rübenrost (*Uromyces betae*) und *Ramularia*-Blattflecken (*Ramularia beticola*). Da beide Schaderreger einen kühleren Temperaturbereich bevorzugen, treten sie eher zum Ende der Saison auf oder haben nur regionalspezifisch eine Bedeutung, insbesondere in den nördlichen Regionen Deutschlands. Aufgrund ihrer geringen Verbreitung sind sie bisher unter epidemiologischen Gesichtspunkten nur wenig erforscht (RACCA ET AL., 2002). Untersuchungen zu Rübenrost aus Nordeuropa zeigen aber, dass wirtschaftliche Ertragsverluste durch die Krankheit möglich sind (SØRENSEN & MARCUSSEN, 1996;

O'SULLIVAN, 1997). Laut WOLF (2001) ist *Ramularia* in weniger als 50 % der deutschen Anbauregionen nachzuweisen. Eine andere Studie spricht von einem Anteil von unter 10 % (LADEWIG ET AL., 2007). Auch der Rübenrost wird auf diesem niedrigen Niveau eingestuft, obwohl ein bayrisches Monitoring von einer Verbreitung von 93 % spricht (WOLF, 2001). Weitere Blattkrankheiten, wie z. B. Phoma-Blattflecken (*Phoma betae*), *Alternaria* (*Alternaria tenuis*) oder Falscher Rübenmehltau (*Peronospora farinosa*) sind in allen Anbaugebieten vertreten, haben aber keine wirtschaftliche Relevanz (RACCA ET AL., 2002).

Schwerpunkt dieser Arbeit sollen die drei Blattkrankheiten Cercospora-Blattflecken, Rübenmehltau und Rübenrost bilden, da sie in den meisten Anbaugebieten in Deutschland vertreten sind und zu wirtschaftlichem Ertragsverlust führen können. Laut einer Umfrage zur Produktionstechnik waren 2009 geschätzte 87 % der Flächen (2005: 70 %; 2007: 95 %) mit wirtschaftlich wichtigen Blattkrankheiten befallen (ROßBERG ET AL., 2010). Obwohl Mischinfektionen laut LADEWIG ET AL. (2007) nur auf 5 % der Flächen vorzufinden sind, wird regional von bis zu 90 % befallenen Flächen, mit bis zu drei Blattkrankheiten am Ende der Saison, berichtet (LANG, 2005). Die Bekämpfungsstrategie für pilzliche Blattkrankheiten berücksichtigt bereits heute Mischinfektionen. Der Schwellenwert, der erreicht sein muss, um eine Fungizidapplikation wirtschaftlich zu rechtfertigen, wird seit 2004 an Hand einer summarischen Bekämpfungsschwelle definiert, die alle Blattkrankheiten gleichwertig berücksichtigt (KAISER ET AL., 2007). Dieser Managementansatz basiert auf einem additiven Effekt der Blattkrankheiten, bei dem keine Interaktionen der Blattkrankheiten zueinander vorausgesetzt werden. Untersuchungen, die dieses interspezifische Verhältnis der Zuckerrüben-Blattkrankheiten zueinander belegen könnten, fehlen.

Bei Betrachtung des Einflusses der Interaktion im Hinblick auf den reinen Schaden liegt laut eines Literaturvergleichs verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen in der Mehrzahl entweder ein Synergismus oder Antagonismus vor (JOHNSON, 1990). Bei der Bewertung des Einflusses der Interaktion in Hinblick auf den Ertrag wird im überwiegenden Teil der Publikationen ein antagonistisches Verhältnis der Arten beschrieben. Der additive Ansatz, wie bei der Bekämpfungsschwelle in Zuckerrüben gewählt, nimmt in beiden Untersuchungsschwerpunkten, die bei JOHNSON (1990) beschrieben werden, nur eine untergeordnete Rolle ein. Die meisten Untersuchungen zum Schadenspotential von Blattkrankheiten an Zuckerrüben werden jedoch in Versuchsreihen mit nur einer Krankheit durchgeführt. Deren Ergebnisse werden dann genutzt, um Schlussfolgerungen für den Pflanzenschutz zu ziehen und diese in eine Strategie umzusetzen, ohne dass die Interaktion berücksichtigt wird.

Neben der Ungewissheit, welche Beziehung zwischen den einzelnen Blattkrankheiten überhaupt vorherrscht, stellt sich in gleichem Maße die Frage, ob sich dieses Verhältnis durch Umwelteinflüsse

in naher oder ferner Zukunft ändern könnte. Hier sind auf der einen Seite anbaubedingte Änderungen anzusprechen, die vor allem durch züchterischen Fortschritt Einzug in die Landwirtschaft halten (MÄRLÄNDER ET AL., 2003; FUCHS ET AL., 2008). Auf der anderen Seite sind die witterungsbedingten Faktoren zu nennen, die einem jährlichen Wandel unterliegen und derzeit, durch die heute schon nachweisbare Klimaerwärmung, einen Schwerpunkt in der aktuellen Klimafolgenforschung bilden (STANHILL, 2001; LI ET AL., 2011).

Der Klimawandel ist auch für die Zuckerrüben-Blattkrankheiten von Bedeutung, da sie sich in ihrem Temperatur- und Feuchtigkeitsanspruch teilweise überschneiden, aber auch Differenzen untereinander aufweisen können (NEWTON & PETURSON, 1943; KLUGE ET AL., 1999). Somit ergibt sich die Frage, welche der Pilzkrankheiten könnte Vorteile aus einer Temperaturerhöhung ziehen und in ihrem Auftreten stärker werden, welche könnte benachteiligt werden und an Bedeutung verlieren und gibt es eine Blattkrankheit, die gänzlich unberührt auf eine Veränderung der Temperatur reagiert.

Diese Arbeit hat deshalb zwei Ziele:

- 1. die Untersuchung der Interaktion von Cercospora, Mehltau und Rost, um festzustellen in welcher Beziehung die drei Blattkrankheiten zueinander stehen, und**
- 2. Aussagen, wie sich dieses Verhältnis im Zuge einer Klimaerwärmung verändern könnte.**

Diese Ziele erforderten folgende Arbeitsschritte:

- Zusammenfassung der epidemiologischen und klimatologischen Ansprüche der Krankheiten an ihre Umwelt, eine Übersicht über frühere Untersuchungen im Bereich der Interaktion bezogen auf die Zuckerrübe, aber auch auf andere landwirtschaftlich bedeutende Schaderreger und ihre mathematische Beschreibung (**Kapitel 2 Stand des Wissens**).
- Darstellung der methodischen Vorgehensweise, aufbauend auf einer Datenanalyse mit Monitoringdaten und eigenen Interaktionsversuchen für die beiden Blattkrankheiten Cercospora und Mehltau (**Kapitel 3 Material & Methode**).
- Vorstellung der Ergebnisse zur aktuellen Befallssituation und Bedeutung der einzelnen Blattkrankheiten in deutschen Anbaugebieten (**Kapitel 4.1 Die Ergebnisse der Felddatenanalyse**).
- Charakterisierung und mathematische Anpassung der Krankheitsentwicklung von Cercospora und Mehltau, unabhängig von dem anderen Interaktionspartner und unter Einfluss steigender Temperaturen (**Kapitel 4.2 Die Ergebnisse der Klimaschrankversuche**).
- Beschreibung und Modellierung der beiden Blattkrankheiten in der Interaktion im Temperaturoptimum unter Zuhilfenahme eines modifizierten Lotka-Volterra-Modells (**Kapitel 4.4 Die Modellierung der Interaktion der zwei Blattkrankheiten**).

- Untersuchung möglicher Folgen einer Klimaerwärmung auf die Interaktion von Cercospora und Mehltau mittels Szenarien-Analyse (**Kapitel 4.5 Die Szenarien-Analyse der Befallssituation in den Interaktionsvarianten unter Annahme einer Klimaerwärmung**).
- Einschätzung von Rost innerhalb der Interaktion durch ein theoretisches Interaktionsmodell (**Kapitel 4.6 Das theoretische Interaktionsmodell mit drei Blattkrankheiten**).
- Verknüpfung der Ergebnisse aus Feld und Labor sowie der unabhängigen und kombinierten Untersuchung der Blattkrankheiten, um die derzeitigen Interaktionsverhältnisse zu bewerten und die Entwicklung ihrer zukünftigen Beziehung in Bezug auf eine Klimaerwärmung vorzunehmen (**Kapitel 5 Diskussion**).

Diese Arbeit bildet den ersten Ansatz einer Interaktionsanalyse, die nicht nur anstrebt die aktuelle Situation zu bewerten, sondern sie möchte auch die zukünftige Entwicklung und Bedeutung der Blattkrankheiten in Bezug auf den Klimawandel einschätzen. Diese Vorgehensweise könnte Anknüpfungspunkt für weitere Untersuchungen sein, die Gegenwart und Zukunft von Pflanzenkrankheiten analysieren und verbinden.

2 Stand des Wissens

2.1 Die ökologischen Nischen der Blattkrankheiten Cercospora, Mehltau und Rost

Der Begriff „ökologische Nische“ umfasst die Summe aus physikalischem Raum, funktioneller Rolle in der Gemeinschaft und Stellung in den Umweltgradienten, wie z. B. Temperatur und Feuchtigkeit (ODUM & OVERBECK, 1999). Zum einen sollen die Gemeinsamkeiten charakterisiert werden, die zu einer Nischenüberlappung führen und somit eine neutrale (o), positive (+) oder negative (-) Beziehung zwischen Cercospora, Mehltau und Rost forcieren. Zum anderen sollen Unterschiede aufgezeigt werden, welche innerhalb der Evolution der Pilze dazu geführt haben, dass jeder von ihnen eine eigene realisierbare Nische belegt, welche sein Fortbestehen bzw. Überleben im Ökosystem „Blattapparat der Zuckerrübe“ sichert.

Was die drei Pilze am stärksten verbindet, ist ihr gemeinsamer Lebensraum bzw. ihr Habitat, das Zuckerrübenblatt. Sie konkurrieren in diesem Bereich um eine Ressource, die ihre Ernährung, ihre Fortpflanzung und somit ihr Fortbestehen sichert. Um auf ein Zuckerrübenblatt zu gelangen, nutzen die Pilze zu Beginn der Saison unterschiedliche Übertragungswege. Cercospora und Rübenrost sind in der Lage, unter hiesigen klimatischen Bedingungen, an Zuckerrübenresten zu überwintern und werden im Frühjahr durch Wind und Regenspritzer auf junge Zuckerrübenpflanzen übertragen (HEITEFUSS ET AL., 2000). Bei Mehltau ist eine Überwinterung bei kühlen Winterverhältnissen, wie in Mitteleuropa vorkommend, erschwert (RUPPEL & TOMASOVIC, 1977). In der zuckerrübenfreien Zeit zieht sich der Pilz in wintermilde Mittelmeergebiete zurück (KONTRADOWITZ & VERREET, 2010). Erst im Frühsommer hält er mit dem Wind wieder Einzug nach Mitteleuropa und infiziert dortige Zuckerrübenbestände.

Welches Pflanzenalter bzw. welches Blattalter die einzelnen Pilze bevorzugen, ist je nach Krankheit ebenfalls unterschiedlich. Junge Blätter werden bevorzugt von Cercospora befallen. Als Ursache dafür werden neben physiologischen Ursachen auch ein höheres Substratangebot bzw. die Zugänglichkeit der noch nicht abgeschlossenen Cutinisierung der Epidermiszellwand genannt (FEINDT ET AL., 1981). Als weitere Punkte für das Favorisieren junger Blätter werden laut FEINDT ET AL. (1981) eine höhere Stomatadichte, die Häufigkeit des Stomatakontaktes sowie die Öffnungsweite der Stomata verantwortlich gemacht. Auch für Rost zeigt sich, dass die Zuckerrübenpflanzen im Alter von 90 bis 150 Tagen nach Aussaat am anfälligsten sind. Ab 180 Tagen nimmt die Anfälligkeit ab (EL-FIKI ET AL., 2007). Mehltau ist im Gegensatz dazu eher auf älteren Blättern zu finden und verursacht dort höhere Befallsstärken, der Grund hierfür wird im geringeren Gehalt an Oxalsäure gesehen (RUPPEL & TOMASOVIC, 1977; AUST & V. HOYNINGEN-HUENE, 1986).

Die Ernährungsweise der drei Blattkrankheiten unterscheidet sich ebenfalls. *Cercospora* ist ein sich perthotroph ernährender Pilz, d. h. der Erreger ernährt sich von abgestorbenem Substrat, dessen Zustand er durch Toxine selbst herbeigeführt hat (AUST ET AL., 1991). Mehltau und Rost hingegen sind obligat biotroph lebende Pilze (FRANCIS, 2002; AGRIOS, 2005). Diese Lebensweise erfordert für den gesamten Lebenszyklus des Schaderregers lebende Wirtszellen (AUST ET AL., 1991). Neben den Ernährungstypen ist ebenso der genaue Lebensraum auf dem Zuckerrübenblatt entscheidend. *Cercospora* dringt über die Stomata in das Wirtsgewebe ein und lebt als Endoparasit innerhalb des Blattes. Als Symptome breiten sich auf der Blattoberfläche 2 bis 3 mm große rundliche Flecken aus. Das zunächst dunkle Gewebe stirbt ab und bildet, umgeben von einem dunklen Rand, Hyphenknoten. Aus ihnen entwickeln sich bräunliche Konidienträger, die lange, schmale mehrfach septierte Konidien tragen und der asexuellen Fortpflanzung dienen (RIECKMANN & STECK, 1995; WOLF, 2001). Rübenrost gehört zu den autözischen Rostpilzen (ohne Wirtswechsel), dessen Entwicklung durch fünf verschiedene Sporenstadien charakterisiert ist (Eu-Typus, makrozyklisch) (HOFFMANN ET AL., 1994). Er wächst wie *Cercospora* subepidermal, dringt nur zur Sporenfreilassung an die Blattaußenseite und ist dort als etwa 1 mm große rostbraune Pustel zu erkennen (WOLF, 2001). Mehltau hingegen ist ein Ektoparasit, d.h. er lebt hauptsächlich außerhalb der Wirtspflanze auf der Blattoberfläche. Dort breitet er sich über das Wachstum des grauweißen Myzels großflächig aus. Um die Nährstoffe innerhalb des Blattes zu erhalten, bildet er Haustorien aus, die sich in den Epidermiszellen des Wirtes verankern (RIECKMANN & STECK, 1995; AGRIOS, 2005).

Die Ansprüche der drei Blattkrankheiten an die Temperatur (°C) sind je nach betrachtetem Abschnitt der Infektionskette sehr unterschiedlich (Abb. 1). Die wenigsten Informationen liegen dabei über Rübenrost vor. Das Optimum der Sporenkeimung wie auch das der Sporulation der Konidien von *Cercospora* und Mehltau überschneiden sich. *Cercospora* hat einen größeren optimalen Bereich bei der Sporenkeimung (25 bis 30 °C) als Mehltau (30 °C) (KLUGE ET AL., 1999). Rübenrost präferiert in dieser Phase einen deutlich kühleren Temperaturbereich (10 bis 22 °C) (NEWTON & PETURSON, 1943). Bei der Sporulation hingegen kann Mehltau das größere Optimum vorweisen (15 bis 40 °C) (DRANDAREVSKI, 1969b; KLUGE ET AL., 1999), *Cercospora* liegt in dieser Phase bei 20 bis 30 °C (BLEIHOLDER & WELTZIEN, 1972b; KLUGE ET AL., 1999). Betrachtet man die Gesamtentwicklung aller drei Blattkrankheiten, so bevorzugen *Cercospora* und Mehltau warme Wetterkonditionen mit einem größeren Optimumbereich für Mehltau. Diese Bedingungen finden die beiden Pilze während der Sommermonate von Juni bis September innerhalb der Zuckerrübensaison in Deutschland vor. Rost hingegen ist ein Pilz, der einen deutlich kleineren und kühleren Temperaturbereich bevorzugt. Aufgrund dieser Eigenschaft tritt er in der Saison relativ spät auf (September bis Oktober).

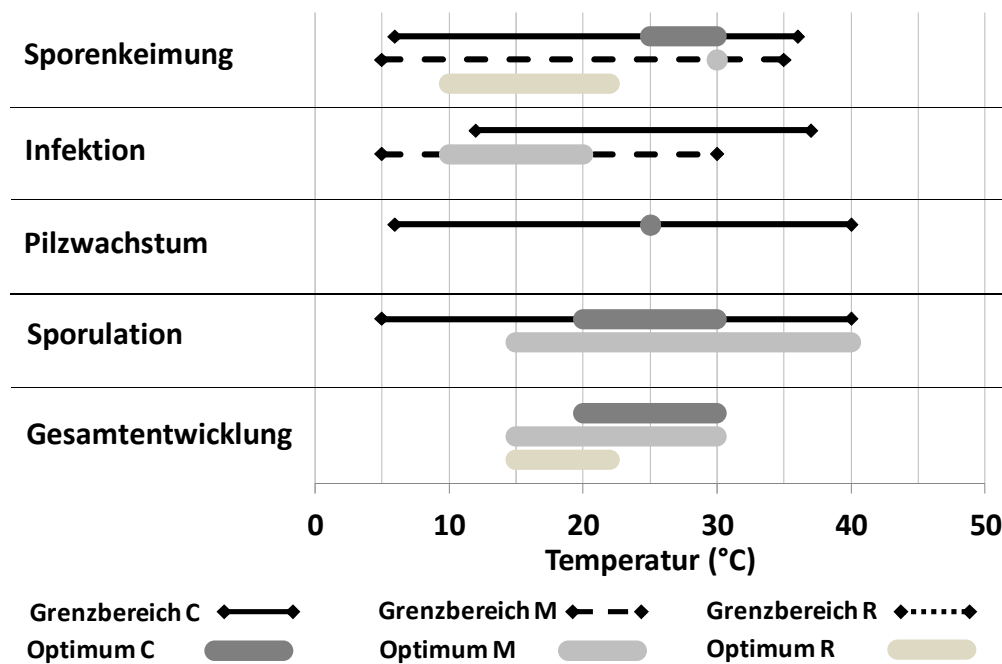


Abb. 1. **Darstellung der Literaturdaten zu den verschiedenen Phasen der Infektkette** der drei Blattkrankheiten *Cercospora* (C), *Mehltau* (M) und *Rost* (R) in Abhängigkeit von der Temperatur (°C). Für *Cercospora* beruhen die Daten auf BLEIHOLDER & WELTZIEN (1972b) und KLUGE ET AL. (1999), für *Mehltau* auf DRANDAREVSKI (1969b) und KLUGE ET AL. (1999) und für *Rost* auf NEWTON & PETURSON (1943). Der Grenzbereich ist als schwarze Linie (C = durchgezogene Linie, M = gestrichelte Linie und R = gepunktete Linie) und das jeweilige Optimum als grauer Balken (C = dunkelgrau, M = mittelgrau und R = hellgrau) dargestellt.

In ihrem Feuchtigkeitsanspruch zeigt sich eine andere Konstellation der Gemeinsamkeiten und Unterschiede. *Cercospora* wie auch *Rost* benötigen eine hohe relative Luftfeuchtigkeit (RH). Ihre Konidienkeimung ist bei einer RH kleiner 90 % gehemmt (WOLF, 2001). Bei *Mehltau* ist es genau umgekehrt. Bei einer RH von 30 bis 40 % liegt die Keimungsrate noch bei 70 % (DRANDAREVSKI, 1969b). Grund hierfür ist der hohe Wassergehalt der Konidien, die eine Versorgung durch die Luftfeuchtigkeit der Umgebung überflüssig macht (WOLF, 2001). *Mehltau* benötigt somit trockenere Wetterbedingungen für ein optimales Wachstum als die anderen beiden Blattkrankheiten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass *Cercospora* warme und feuchte, *Mehltau* warme und trockene und *Rost* kühle und feuchte Klimabedingungen bevorzugt. Für die Besiedlung des Wirtes benötigen die Blattkrankheiten unterschiedlich lange Zeiten. Hierfür wird die jeweilige Inkubationszeit der Pilze miteinander verglichen. Sie beschreibt die Phase vom Anlanden der Konidien bis zum Auftreten der ersten Symptome (AUST ET AL., 1991). *Cercospora* benötigt für die erfolgreiche Besiedlung der Zuckerrübe zwischen 9,5 bis 11,6 Tage bei einer Temperatur von 27 bzw. 22 °C (BLEIHOLDER & WELTZIEN, 1972a; b). *Mehltau* kann in diesem optimalen Temperaturbereich seine Epidemie schneller aufbauen. Bis zu den ersten Symptomen vergehen nur 6 bis 7 Tage bei 25 bzw. 30 °C (DRANDAREVSKI, 1969a; b). Die Inkubationszeit von *Rost* ist um einiges länger.

Tab. 1. Die **tabellarische Zusammenfassung der epidemiologischen Eigenschaften** der drei Blattkrankheiten Cercospora-Blattflecken (*Cercospora beticola*), Rübenmehltau (*Erysiphe betae*) und Rübenrost (*Uromyces betae*).

Eigenschaft	<i>Cercospora beticola</i>	<i>Erysiphe betae</i>	<i>Uromyces betae</i>
Habitat	Zuckerrübenblatt	Zuckerrübenblatt	Zuckerrübenblatt
Überwinterung	Mitteleuropa	Südeuropa	Mitteleuropa
Übertragungsweg	Wind und Regen	Wind	Wind und Regen
Ernährungsweise	perthotroph	obligat biotroph	obligat biotroph
Lebensraum	Endoparasit	Ektoparasit	Endoparasit
Temperatur (°C)			
Gesamtentwicklung	20-30 °C	15-30 °C	15-22 °C
Feuchtigkeitsanspruch	>90 %	30-40 %	>90 %
Klimaanspruch	warm und feucht	warm und trocken	kühl und feucht
Inkubationszeit im Temperatur-optimum	9,5-11,6 Tage	6-7 Tage	16-19 Tage

Bei 15 °C benötigt er 16 bis 19 Tage und hat damit die längste Etablierungsphase der drei Krankheiten im Temperaturoptimum (RASMUSSEN (1992) zitiert durch RÄDER (2002)).

Der gesamte Komplex der genannten Eigenschaften in Tabelle 1 sorgt dafür, dass je nach Wetterlage für ein Jahr oder eine Region zeitliche und räumliche Unterschiede im Vorhandensein und Auftreten der drei Krankheiten festzustellen sind.

2.2 Die Definition von Interaktionsverhältnissen

Die Interaktion ist ein Begriff der Populationsökologie, die die Wechselwirkungen der Individuen innerhalb einer Population und zwischen dieser und ihrer Umwelt beschreibt (AUST ET AL., 1991). Ein wesentlicher Inhalt ist die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen zwei Populationen verschiedener Arten. Diese interspezifische Beziehung kann eine positive (+), negative (-) oder neutrale (o) wechselseitige Beziehung zwischen Organismen beschreiben. Schon 1879 formulierte DE BARY in seinem Vortrag „Die Erscheinung der Symbiose“ das Phänomen der synergistischen und antagonistischen Interaktion bei höheren Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen. Insgesamt können dabei neun Fälle unterschieden werden, die in Abbildung 2 als Schaubild dargestellt sind (ODUM & OVERBECK, 1999; BRAUN, 2000). Das Verhältnis, in dem sich die Arten nicht gegenseitig beeinflussen, wird als *Neutralismus* bezeichnet. Bleibt nur eine Population unbeeinflusst und die andere wird gehemmt, wird dies *Amensalismus* genannt. Tritt für die zweite Population genau der umgekehrte Fall ein, nämlich der einer Förderung, und die andere Population bleibt weiterhin ohne Einfluss, wird dies als *Kommensalismus* bezeichnet.

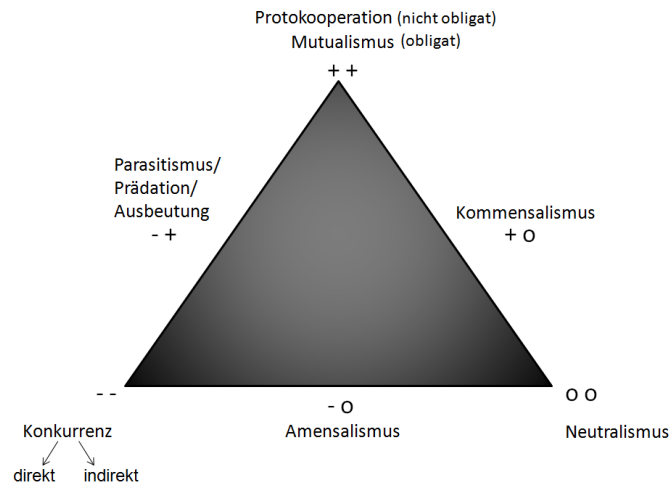


Abb. 2. Die Analyse der **Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Arten** (BRAUN (2000) nach ODUM & OVERBECK (1999)). Erklärung: (o) neutral/keine signifikante Wechselbeziehung, (+) positiv/Wachstum, Überleben oder andere fördernde Eigenschaften, (-) negativ/Hemmung von Populationswachstum oder anderen Eigenschaften.

Ziehen beide Populationen einen Vorteil aus der Beziehung, werden zwei Fälle unterschieden: zum einen die *Protokooperation*, sie bringt Förderung für beide Populationen, ist aber nicht obligat. Zum anderen der *Mutualismus*, bei dem das Zusammenleben für das Überleben der Arten existenziell ist. Hat eine Art Vorteile aus der Interaktion und die andere Art erleidet Nachteile aus der Beziehung, werden ebenfalls mehrere Fälle unterschieden. Auf der einen Seite gibt es den *Parasitismus*, bei dem im Allgemeinen die Art des Wirtes größer ist als die des Parasiten. Auf der anderen Seite ist die *Prädation* zu nennen, bei der das Größenverhältnis von Räuber (groß) zu Beute (klein) genau umgekehrt ist. Bei Parasitismus und Prädation stehen die beiden Arten auf unterschiedlichen trophischen Ebenen. Stehen zwei Arten auf einer trophischen Ebene (gleich groß), gibt es bisher keinen Fachbegriff, der diese Art von Wechselbeziehung beschreibt.

Der Kategorie *Konkurrenz* gehören zwei Wechselbeziehungen an. In dieser Interaktion wird die direkte und indirekte Konkurrenz unterschieden. *Direkte Konkurrenz*, auch als Interferenz bezeichnet, bezieht sich auf den direkten Einfluss der einen Art auf die andere. Bei der *indirekten Konkurrenz* (Exploitation) wirkt sich die Wechselbeziehung über die gemeinsame Ressource aus. Eine scharfe Einteilung, so wie hier vorgestellt, ist aber in vielen Fällen nicht immer möglich. Interspezifische Beziehungen können sich durch wechselnde Umweltbedingungen und den Einfluss verschiedener Phasen im Lebenszyklus der agierenden Arten verändern (DE BARY (1879) zitiert durch WEINDLING (1938)). Die Fälle Konkurrenz, Amensalismus und Parasitismus bzw. Prädation können unter dem Sammelbegriff Antagonismus zusammengefasst werden (MEHRINGER, 2010).

Wie schon in der Einleitung beschrieben, dominiert das Vorkommen von antagonistischen Interaktionen zwischen landwirtschaftlichen Schaderregern in Bezug auf den Ertragseinfluss

(JOHNSON, 1990). Auch CONNELLS (1983) und SCHOENER (1983) bestätigten die Dominanz von interspezifischer Konkurrenz. Ihre Arbeiten bezogen sich nicht nur auf die Landwirtschaft, sondern den gesamten Bereich der Populationsökologie. TOWNSEND ET AL. (2009) merkten zu den Literaturrecherchen allerdings an, dass die Anzahl der Publikationen nicht unbedingt ein Indiz für das tatsächliche Verhältnis von synergistischen zu antagonistischen Beziehungen darstellen kann, da möglicherweise nur die „interessanten“ Beziehungen untersucht und Ergebnisse eines Synergismus oder sogar Neutralismus erst gar nicht veröffentlicht werden.

2.3 Die Interaktionsverhältnisse bei landwirtschaftlich bedeutender Schaderreger

Die meisten Untersuchungen auf dem Gebiet der Populationsökologie sind im Bereich terrestrischer Pflanzen und Tiere sowie Meeresorganismen vorzufinden (CONNELL, 1983; SCHOENER, 1983), die wie in Kapitel 2.2 beschrieben, hauptsächlich antagonistische Beziehungen beschreiben. Im Bereich der Mykologie wird seit den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts die Interaktion zwischen verschiedenen Pilzarten und der Einfluss zwischen Pilz und Wirt untersucht (PORTER & CARTER, 1938; WEINDLING, 1938). Das berühmteste Beispiel aus der Pilzwissenschaft ist dabei die Symbiose der Mykorrhizapilze und ihren Wirtspflanzen (ALLEN ET AL., 2003; BONFANTE & ANCA, 2009). Publikationen im Bereich landwirtschaftlicher Schaderreger sind im Vergleich dazu rar gesät (VOLLMER, 2005). In einigen Veröffentlichungen werden zwar aufgrund von Beobachtungen Vermutungen formuliert (RUSSELL, 1970; WOLF, 2001), diese aber nicht durch genauere Untersuchungen verifiziert.

Für pilzliche Blattkrankheiten gibt VOLLMER (2005) in ihrer Arbeit einen ausführlichen Überblick über verschiedene experimentelle Forschungsarbeiten bei interspezifischen Beziehungen von zwei interagierenden Blattkrankheiten. Sie unterteilt dabei drei Fälle, die sich aufgrund der Ernährungsweisen unterscheiden: 1. biotroph-biotroph, 2. biotroph-nekrotroph 3. nekrotroph-nekrotroph. Bei der Biotrophie ist der Organismus auf lebendes Wirtsgewebe angewiesen, wohingegen sich bei der Nekrotrophie der Organismus von totem Substrat ernährt, dessen Absterben er nicht verursacht hat (AUST ET AL., 1991). In der ersten Kategorie „biotroph-biotroph“ wurden vier Untersuchungen zu Zwergrost (*Puccinia hordei*) und Mehltau (*Blumeria graminis f.sp. hordei*) an Gerste verglichen (SIMKIN & WHEELER, 1974; ROUND & WHEELER, 1978; KIESSLING & HOFFMANN, 1985; OLESEN, 2005). Bei allen Studien stellte sich heraus, dass die Pilzart Nachteile aus der Interaktion zieht, die zuletzt den Wirt besiedelt. Der spätere Infektionszeitpunkt hat somit negative Folgen auf die Größe und die Anzahl der Pusteln.

Bei der zweiten Kategorie „biotroph-nekrotroph“ wurden insgesamt acht verschiedene Kombinationen von Pathogenen in den Kulturen Gartenbohne, Weizen und Gerste analysiert. In den

meisten Studien wurde die biotrophe Art negativ durch die nekrotrophe Art beeinflusst (MADARIAGA & SCHAREN, 1986; SPADAFORA & COLE, 1987; DE JESUS ET AL., 2001). Zusätzlich konnte in einigen Untersuchungen eine Förderung des nekrotrophen Pilzes durch die biotrophe Art nachgewiesen werden (WEBER, 1996; AL-NAIMI ET AL., 2005). Die Begünstigung der nekrotrophen Krankheit wird in der Akkumulation von Nährstoffen durch die biotrophe Art begründet.

Bei der dritten Kategorie „nekrotroph-nekrotroph“ wurden insgesamt zehn Veröffentlichungen aus den Kulturen Weizen, Gerste und Sorghumhirse verglichen. Die Analyse zeigte kein so eindeutiges Bild, wie es zuvor bei den anderen beiden Kategorien der Fall war. Bei der Schaderregerkombination *Bipolaris sorokiniana* mit *Pyrenophora tritici-repentis* oder *Septoria passerinii* dominierte immer *B. sorokiniana* über die andere Blattkrankheit (WIBE & MORTON, 1962; DALUZ & BERGSTROM, 1987). Bei der Wechselbeziehung zwischen *Septoria nodorum* und *Septoria tritici* wird die Sporenproduktion von *S. nodorum* in der Kombinationsvariante gefördert, *S. tritici* wird im Gegensatz dazu gehemmt (NOLAN ET AL., 1999). Bei der Untersuchung des gegenseitigen Einflusses von *S. nodorum* und *S. tritici* auf die Befallsstärke wurde keine Interaktion festgestellt (JONES & ODEBUNMI, 1971; HARROWER, 1978).

Bei allen drei Kategorien ist es möglich, dass der Befall der Wirtspflanze durch ein Pathogen die Prädisposition gegenüber einem anderen Erreger verändern kann (YARWOOD, 1959).

Die meisten Untersuchungen wurden unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus oder Labor mit künstlicher Inokulumdichte durchgeführt, um eine Interaktion zu provozieren. Dieser Umstand kann zur Folge haben, dass Interaktionen überschätzt werden (VOLLMER, 2005). Der gleichen Meinung ist auch HAU (2001), der nur eine eingeschränkte Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf Freilandsituationen sieht. Der Einfluss des Zeitpunktes der Inokulation, die Menge des Inokulums, das Wirtsalter und andere Charakteristika von Pathogen und Wirt können die Interaktion maßgeblich beeinflussen.

2.4 Die Interaktionsverhältnisse bei Blattkrankheiten an Zuckerrüben

In der Literatur wird bisher nur wenig über das Interaktionsverhältnis von Blattkrankheiten an Zuckerrüben berichtet. RUSSELL (1970) beschreibt Beobachtungen aus Experimenten, die Hinweise zu Interaktionen von Pilzkrankheiten an Zuckerrüben geben. Der Befall von Falschem Rübenmehltau (*P. farinosa*) fördert den Befall mit Echtem Rübenmehltau. Als Ursache wird der Einfluss von *P. farinosa* auf den Stoffwechsel der Wirtspflanze gesehen. Bei gesunden Zuckerrüben scheint der erhöhte Zuckergehalt der Blätter die Mehltauanfälligkeit zu reduzieren.

Für die Krankheiten Echter Mehltau und Ramularia-Blattflecken wird bei RUSSELL (1970) von einer antagonistischen Wechselbeziehung gesprochen. Bei Blättern mit einem hohen Mehltaubefall wurde

wenig bis keine *Ramularia* gefunden. *Ramularia* bevorzugt im Gegensatz zu Mehltau einen hohen Zuckergehalt im Blattapparat.

Die Interaktion zwischen Echtem Rübenmehltau und Rübenrost wird ebenfalls als Antagonismus beschrieben, wobei der Mechanismus als indirekter Antagonismus bezeichnet werden kann. Er wird durch die Sortenresistenz der Wirtspflanze, gegen die jeweils andere Krankheit, begründet. Bei dieser „biotroph-biotroph“-Konstellation wurde, anders als bei VOLLMER (2005), der Einfluss des Infektionszeitpunktes nicht untersucht. An anderer Stelle wird die These aufgestellt, dass mit Rübenrost befallene Pflanzen eine wesentlich stärkere Mehltauanfälligkeit aufweisen (ANONYMUS, 2010a). Diese These beruht auf Beobachtungen, die zu Befallsbeginn häufig Mehltaukolonien um Rostpusteln herum feststellten.

Das Interaktionsverhältnis von *Cercospora* und Mehltau war bisher noch nicht Gegenstand der Forschung. In der Literatur gibt es nur eine Quelle, die bezüglich der interspezifischen Beziehung der beiden Pilze eine These über ihr Interaktionsverhältnis aufstellt. WOLF (2001) vermutet aufgrund der unterschiedlichen Ernährungsweise „perthotroph-biotroph“ einen ausgesprochenen Antagonismus zu Gunsten von *Cercospora*. Starker Mehltaubefall ist nur bei Fehlen der Blattfleckenkrankheit möglich. Er weist aber auch auf den Einfluss von Witterung, Sortenreaktion und Fungizidselektivität hin, welche die Priorität des Auftretens verändern können.

Bezüglich der interspezifischen Beziehung zwischen *Cercospora* und Rost gibt es in der Literatur bisher keine Hinweise über die Interaktion der beiden Blattkrankheiten.

2.5 Die mathematische Beschreibung von Interaktionen (Das Lotka-Volterra Modell)

Das klassische Modell, um das Wachstum von zwei konkurrierenden Arten zu beschreiben, hat folgende Differentialgleichungen:

$$\frac{dy_1}{dt} = r_1 y_1 (1 - [y_1 + \alpha_{12} y_2] / K_1) \quad (1)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = r_2 y_2 (1 - [y_2 + \alpha_{21} y_1] / K_2) \quad (2)$$

Im sogenannten Lotka-Volterra Modell (LV-Modell) (LOTKA, 1925; VOLTERRA, 1926) wird mit y_1 und y_2 die Populationsgröße der jeweiligen Art beschrieben. Die Parameter r_1 und r_2 stehen für die spezifischen Wachstumsraten, K_1 und K_2 für die Kapazitäten in Abwesenheit der jeweiligen anderen Art (maximale Populationsgröße) und α_{12} sowie α_{21} sind die Konkurrenzkoeffizienten. Der Koeffizient α_{12} beschreibt dabei den Einfluss von Art 2 auf Art 1. Für α_{21} wird der Einfluss genau umgekehrt

definiert. Insgesamt müssen sechs Parameter geschätzt werden, um das Wachstum von zwei konkurrierenden Arten zu beschreiben. Die Grundannahme dieses Modells beruht auf logistischem Wachstum. Die beiden gekoppelten Gleichungen können nur numerisch-approximativ und nicht analytisch gelöst werden.

Wird das klassische LV-Modell für zwei Arten auf die Interaktion von n Arten erweitert, so führt dies mit zunehmender Artenzahl zu einem komplexen Gleichungssystem.

$$\frac{dy_1}{dt} = r_1 y_1 (1 - [y_1 + \alpha_{12}y_2 + \alpha_{13}y_3 + \dots + \alpha_{1n}y_n] / K_1) \quad (3)$$

.

.

.

$$\frac{dy_n}{dt} = r_n y_n (1 - [y_n + \alpha_{n1}y_1 + \alpha_{n2}y_2 + \dots + \alpha_{nn-1}y_{n-1}] / K_n) \quad (4)$$

Für jede weitere Art wird eine zusätzliche Gleichung benötigt. Außerdem müssen für jeden zusätzlichen Interaktionspartner Konkurrenzeffekte auf die jeweils anderen Akteure bzw. von diesen anderen Akteuren auf jede zusätzliche Art geschätzt werden.

Da die verwendete Literatur in diesem Kapitel auf die Interaktion von zwei Arten beschränkt ist, wird im weiteren Verlauf dieses Abschnittes das Gleichungssystem mit zwei interagierenden Arten verwendet. Die jeweiligen Ansätze sind aber ebenso auf die Nutzung mit n Spezies übertragbar.

Als Beispiele für die Anwendung des LV-Modells in der Phytopathologie können zwei Publikationen genannt werden. Die erste Arbeit beschäftigt sich mit der Interaktion von zwei Tabakviren (MADDEN ET AL., 1987). Zu Beginn der Arbeit lagen keine Informationen zur Art der interspezifischen Beziehung vor. Die Interaktion wurde in Einzel- und Kombinationsvarianten im Freiland studiert. Mit dem LV-Modell konnten die Krankheitsverläufe sehr gut geschätzt werden. Die Analyse der Konkurrenzkoeffizienten ergab, dass 70 % der Koeffizienten gleich Null waren. Somit konnte die These der Konkurrenz zwischen den beiden Viren nicht bestätigt werden. Die zweite Publikation beschäftigt sich mit zwei Krankheiten an Sorghum (NGUGI ET AL., 2001). Auch hier wurde ein Konkurrenzverhältnis als Hypothese angenommen und mit natürlichem Inokulum im Feldexperiment gearbeitet. Der Vergleich der Konkurrenzkoeffizienten ergab auch in diesem Fall keine signifikanten Unterschiede zu Null.

Neben der Durchführung von Kombinationsvarianten zur Schätzung der Interaktion ist es laut RICHTER ET AL. (1988) zusätzlich notwendig, unabhängige Befallsverläufe von den zu untersuchenden Krankheiten in Einzelversuchen zu erheben. Diese sollten parallel zu den Kombinationsvarianten durchgeführt werden, damit sie den gleichen Versuchsbedingungen unterliegen. Somit werden

zusätzlich zu Gleichung (1) und (2) zwei weitere Differenzialgleichungen benötigt, die die Blattkrankheiten unabhängig voneinander beschreiben.

$$\frac{dy_1}{dt} = r_1 y_1 (1 - y_1/K_1) \quad (5)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = r_2 y_2 (1 - y_2/K_2) \quad (6)$$

Neben der Ergänzung des Modells durch Befallsverläufe der Einzelkrankheiten hat das klassische LV-Modell in Bezug auf die Beschreibung von Krankheitsverläufen einen Nachteil (HAU, 2001). Es erlaubt einen Rückgang der Krankheitsintensität, was bei Blattkrankheiten, die die Blattfläche unwiderruflich zerstören, nicht möglich ist. Hier kann es im besten Fall bei einem gleichbleibenden Schadensniveau bleiben. Demzufolge kann die Änderung der Befallsentwicklung nur Werte gleich oder größer Null annehmen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, führte WEBER (1992) folgenden Zusatz in den klassischen Ansatz ein:

$$\frac{dy_1}{dt} = \max\{0, r_1 y_1 (1 - [y_1 + \alpha_{12}y_2] / K_1)\} \quad (7)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \max\{0, r_2 y_2 (1 - [y_2 + \alpha_{21}y_1] / K_2)\} \quad (8)$$

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Ansatz $\max\{0, \dots\}$ als modifiziertes LV-Modell bezeichnet. WEBER (1992) nutzte das modifizierte LV-Modell, um das Interaktionsverhältnis von Mehltau (*Blumeria graminis*, früher *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici*) und der Blatt- und Spelzenbräune (*Phaeosphaeria nodorum*, früher *Septoria nodorum*) an Winterweizen zu beschreiben. Aus anderen Arbeiten war bereits bekannt, dass *Septoria*-Blattbräune eine hemmende Wirkung auf Mehltau ausübt. Um Befallsrückgänge auszuschließen, wurde die obengenannte $\max\{\dots\}$ -Funktion eingeführt. Für *Septoria* hat die Interaktion positive Effekte. Mehltau hat eine befallsfördernde Wirkung auf *Septoria*. Die unterschiedlichen Folgen der Interaktion lässt WEBER (1992) nicht nur über die Konkurrenzkoefizienten in die Differenzialgleichungen einfließen, sondern auch durch verschiedene Modellansätze beschreiben. In einem Modellansatz koppelt er die Interaktion an die Kapazität. Dies bedingt eine Förderung von *Septoria* durch Mehltau und im umgekehrten Fall eine Hemmung der biotrophen Blattkrankheit Mehltau:

$$\frac{dy_M}{dt} = \max\{0, r_M y_M (1 - y_M/K_M - \alpha_S y_S)\} \quad (9)$$

$$\frac{dy_S}{dt} = r_S y_S (1 - y_S/K_S + \alpha_M y_M) \quad (10)$$

Die Indizes M und S stehen dabei für die beiden Krankheiten Mehltau und Septoria. Der zweite Ansatz von WEBER (1992) zeigt die Kopplung an den Einfluss der Wachstumsrate von Septoria:

$$\frac{dy_M}{dt} = \max\{0, r_M y_M (1 - y_M/K_M - \alpha_S y_S)\} \quad (11)$$

$$\frac{dy_S}{dt} = r_S (1 + \alpha_M y_M) y_S (1 - y_S/K_S) \quad (12)$$

HAU (2001) integriert die Kopplung der Interaktion an die Kapazität und die Wachstumsrate in das klassische LV-Modell und schafft somit ein flexibles Modell mit zusätzlichen Parametern zur Beschreibung der Konkurrenz:

$$\frac{dy_1}{dt} = r_1 (1 - \alpha_{12} y_2/K_1) y_1 (1 - y_1/[K_1(1 - \beta_{12} y_2/K_1)]) \quad (13)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = r_2 (1 - \alpha_{21} y_1/K_2) y_2 (1 - y_2/[K_2(1 - \beta_{21} y_1/K_2)]) \quad (14)$$

Die Koeffizienten α_{ij} beschreiben den Einfluss auf die Wachstumsrate und die Koeffizienten β_{ij} den Einfluss auf die Kapazität. Auch der Ansatz des modifizierten LV-Modells ist bei diesem Gleichungssystem einsetzbar, bisher aber noch nicht beschrieben.

2.6 Der Anspruch der Blattkrankheiten an das Klima

Die Zuckerrübe hat durch die Kultivierung ihren Weg aus dem marinen Klima über das semiaride ins aride Klima gefunden (DRANDAREVSKI, 1969c). Wo sich der Wirt befindet, kann sich auch ein Krankheitserreger potentiell ausbreiten. Wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, bevorzugen Cercospora und Mehltau warme Gebiete mit einer mittleren Monatstemperatur von über 20 °C (DRANDAREVSKI, 1969c; BLEIHOLDER & WELTZIEN, 1972c). Die beiden Blattkrankheiten unterscheiden sich in ihrem Feuchtigkeitsanspruch. Mehltau präferiert als Xerophyt trockene bzw. aride Zonen, wohingegen Cercospora für eine optimale Entwicklung humide Regionen benötigt (BLEIHOLDER & WELTZIEN, 1972c). Diesen Anspruch teilt auch Rübenrost, der im Gegensatz zur Blattfleckenkrankheit einen kühleren Temperaturbereich bevorzugt.

Hauptschadgebiete, in denen *Cercospora* auftritt, sind die Po-Ebene in Norditalien, Zuckerrübengebiete im Donautal von Niederösterreich, Ungarn und dem ehemaligen Jugoslawien (heutiges Serbien), die Schwarzmeerregion der Türkei und Uruguay in Südamerika (BLEIHOLDER & WELTZIEN, 1972c). Die europäischen Anbauggebiete sind gekennzeichnet durch einen deutlichen Nord-Süd-Gradienten in Bezug auf das Auftreten von *Cercospora*-Blattflecken (BEHN ET AL., 2011). Das Erstauftreten variiert in den weltweiten Anbauregionen sehr stark. WOLF (2001) fasst hierzu einige Beobachtungen aus verschiedenen Teilen der Erde zusammen. In der Türkei kann bereits ab Mitte Juni mit dem Beginn der *Cercospora*-Epidemie gerechnet werden. In den italienischen Risikogebieten war das früheste Erstauftreten in der letzten Junidekade. Im Mittel lag es aber um den 190,7 Kalendertag (KT) mit einer Spannweite von 36 Tagen (WOLF, 2001). In Nordamerika sind erste Symptome in der ersten Julidekade zu beobachten, genauso wie in Süddeutschland, wo aber schwerpunktmäßig erst einen Monat später (erste Augustdekade) mit dem Auftreten zu rechnen ist (WOLF, 2001). In Niedersachsen wurde für 8 Jahre (1999, 2002-2008) ein Erstauftreten im Mittel um den 198. KT (16. Juli) ermittelt (RICHERZHAGEN ET AL., 2011).

Die bevorzugten Schadgebiete des Rübenmehltaus liegen in Südeuropa, der Türkei, im Nahen Osten, in Südasien und im Südwesten der USA (LENZ, 2002). Das Schadenspotential dieser Blattkrankheit nimmt in Europa nach Südosten hin zu. Die Ausbreitung in feucht-kühle Gebiete scheint in den letzten Jahren zuzunehmen und ist vermutlich auf die gute Anpassungsfähigkeit des Erregers zurückzuführen. Eine Spritzung gegen Mehltau wurde erst seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts praxisrelevant (BYFORD, 1996). Der Klimawandel könnte eine Ursache sein, dass der Pilz in Gebieten vorkommt, in denen er zuvor noch nicht beschrieben wurde. Die Verbreitung von einigen Mehltaupilzen in Europa, außerhalb der bekannten Regionen, ist dokumentiert (GLAWE, 2008). Mit einem Erstauftreten ist, laut einer deutschen Fallstudie, frühestens in der 30. Kalenderwoche (Ende Juli) zu rechnen, der Schwerpunkt des Auftretens liegt jedoch in der zweiten Augushälfte (WOLF, 2001).

Der Rübenrost kommt vor allem in Nordeuropa in Gebieten mit maritimem Klimaeinfluss vor, was Berichte aus Irland, Dänemark, England und Frankreich bestätigen (BYFORD, 1996; SØRENSEN & MARCUSSEN, 1996; O'SULLIVAN, 1997). Über eine Zu- oder Abnahme des Befalls in den letzten Jahren sind keine Berichte vorhanden. Aufgrund seiner Ansprüche an ein kühleres Klima, ist mit einem Auftreten sehr früh oder spät in der Saison zu rechnen.

2.7 Der Klimawandel in Deutschland

Die Betrachtung von langjährigen Wetteraufzeichnungen zeigen, dass in Deutschland ein Temperaturanstieg zu beobachten ist (ZEBISCH ET AL., 2005). Zwischen 1901 und 2006 konnte ein Anstieg um knapp 0,9 °C der mittleren Lufttemperatur in Deutschland festgestellt werden (ANONYMUS, 2008). Regional gab es jedoch starke Unterschiede, die sich überdurchschnittlich hoch in Südwestdeutschland zeigten (ZEBISCH ET AL., 2005; ANONYMUS, 2008).

Die Niederschläge unterscheiden sich in Deutschland räumlich und saisonal sehr stark (ZEBISCH ET AL., 2005), es lassen sich jedoch langfristig bisher keine signifikanten Trends in der Verteilung erkennen. In den letzten 30 Jahren wurde jedoch eine deutliche Erhöhung der Winterniederschläge registriert (ZEBISCH ET AL., 2005).

Die Zunahme von Klimaextremen wie Hitzetage ($T > 30\text{ °C}$) oder Hitzewellen (Zeitintervalle von mehr als 3 Tagen, in denen die Tagesmaxima über einer, bezogen auf das stationsabhängige Temperaturniveau hohen oberen Schwelle liegen) ist deutlich feststellbar (ZEBISCH ET AL., 2005).

Für eine Klimaerwärmung, wie sie derzeit beobachtet wird, können verschiedene Ursachen genannt werden. Neben der Änderung der ankommenden und reflektierten Sonnenstrahlung und einer internen Variabilität des Klimasystems, wird als Hauptfaktor die Änderung der in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung durch die Zunahme von anthropogen verursachten Treibhausgasen in der Erdatmosphäre genannt (LEHMANN ET AL., 2013). Welcher der drei Gründe für die globale Klimaerwärmung verantwortlich ist, wird in der aktuellen Klimaforschung zum Teil kontrovers diskutiert (VAHRENHOLT & LÜNING, 2012). Expertenbefragungen wie auch verschiedene Auswertungen von wissenschaftlichen Veröffentlichungen haben ergeben, dass 97 -98 % der Publikationen, den Menschen als Verursacher der Klimaerwärmung sehen (ANDEREGG ET AL., 2010; COOK ET AL., 2013).

Um nicht nur die Ursachen sondern auch die Folgen einer Klimaerwärmung einordnen zu können, werden verschiedene Modellrechnungen über zukünftige Klimaveränderungen eingesetzt. Je nach Wahl des Emissionsszenarios und des regionalen Klimamodells wird die durchschnittliche Erwärmung für Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2050 um 0,5 bis 1,5 °C und im Zeitraum 2071 bis 2100 um 1,5 bis 3,5 °C betragen (ANONYMUS, 2008). An anderer Stelle (ZEBISCH ET AL., 2005) wird eine Spanne von 1,6 bis 3,8 °C bis zum Jahr 2080 beschrieben. Bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8,3 °C für Deutschland von 1891 bis 2010 (DWD, 2012) entspricht ein Plus von 0,5 °C einer Steigerung von 6,02 %, 1,5 °C sind eine Steigerung um 18,07 % und 3,5 °C sind eine Erhöhung um 42,17 %. Bei einer Erwärmung um 1,6 °C würde dies einer Zunahme von 19,28 % entsprechen und bei 3,8 °C wäre ein Plus von 45,78 % zu verzeichnen.

Für die Niederschläge wird eine bundesweite Abnahme um bis zu 40 % im Sommer und eine Zunahme von 0 bis 40 % im Winter geschätzt (ANONYMUS, 2008). Die Jahresniederschlagsmenge zeigt

insgesamt nur geringe Veränderung bis 2080 von unter 10 % (ZEBISCH ET AL., 2005). Über die räumliche Verteilung besteht jedoch noch eine große Unsicherheit.

2.8 Der Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von Zuckerrüben-Blattkrankheiten in Deutschland

Durch eine jährlich durchgeführte Expertenbefragung wurde festgestellt, dass von 1994 bis 2005 ein enormer Anstieg der Blattkrankheiten in Zuckerrüben stattgefunden hat (LADEWIG ET AL., 2007). Der Anteil der mit Fungiziden behandelten Zuckerrübenflächen wurde in dieser Umfrage für das Jahr 2005 auf 50 %, 2007 auf 81 % und 2009 auf 75 % geschätzt. Diese Beobachtung wird ebenfalls durch die NEPTUN-Studie bestätigt, die einen Anstieg des Behandlungsindex für Fungizide in Zuckerrüben von 0,44 im Jahre 2005 auf 0,85 in 2007 dokumentierte (ROßBERG ET AL., 2010). Auch in den Nachbarländern von Deutschland wird ein Anstieg registriert. In den Niederlanden breitete sich insbesondere *Cercospora* weitläufig aus. Der Anteil befallener Flächen stieg innerhalb von nur 3 Jahren (2000-2002) von 13 auf 32 % (VEREIJSEN, 2004). Welche Ursachen hinter dem vermehrten Auftreten stehen könnten, wurde bisher nicht untersucht. Neben der Konzentration des Anbaus in bestimmten Regionen, dem Verbleib des Zuckerrübenblattes auf dem Feld und pflugloser Bodenbearbeitung könnte ein weiterer Grund der Klimawandel sein (VEREIJSEN, 2004; LANG, 2005). Ein verändertes Klima, das sich in der letzten Dekade bereits durch erhöhte Mittelwerttemperaturen und Extremwetterereignisse, wie z. B. zu warme oder zu trockene Jahreszeiten, äußerte (ZEBISCH ET AL., 2005), kann das Auftreten und die Intensität bestimmter Schaderreger fördern.

Laut einer Klimastudie für das Bundesland Nordrhein-Westfalen gibt es bis 2050 eine unterschiedliche Risikobewertungen für die verschiedenen Regionen und Krankheiten im Land (ANONYMUS, 2010b). Für die Köln-Aachener Bucht, eine vom Zuckerrübenanbau dominierte Region, steigt das Infektionsrisiko für *Cercospora* deutlich. In den anderen fünf Regionen bleibt das Risiko konstant bzw. steigt nur in einigen Einzeljahren. Die Bedeutung von Mehltau nimmt für alle Regionen zu, besonders am Niederrhein könnte sich das Risiko stärker erhöhen. Das Verhältnis der Regionen zueinander in der Stellung der Mehltauanfälligkeit wird sich jedoch nicht ändern (höher Köln-Aachener Bucht/niedriger Übergangslage Ostwestfalen). *Cercospora* wird, laut dieser Studie, die dominierende Krankheit bleiben. Ein anderer Artikel deutet ebenfalls auf eine Zunahme der beiden Krankheiten hin, insbesondere für *Cercospora* in Bewässerungsgebieten (BEHN ET AL., 2011). Der Rübenrost, wie auch die *Ramularia*-Blattfleckenkrankheit, werden ihrer Ansicht nach nicht vom Klimawandel profitieren, da sie feucht-kühle Bedingungen bevorzugen.

In der Arbeit von RICHERZHAGEN ET AL. (2011) wird durch die Kombination von Klimamodell und Prognosemodell für *Cercospora* ein deutlich früheres Erstauftreten bis 2100 simuliert. Die Differenz im Vergleich zum heutigen Erstauftreten wird bis 2050 zwischen 5 und 11 Tage und bis 2100 zwischen 23 und 32 Tage betragen. Der Zeitpunkt der Infektion scheint somit durch den Klimawandel beeinflussbar. Ob sich der Klimawandel ebenfalls auf die Kapazität (maximales Befallsniveau) der Krankheit sowie auf die Wachstumsrate (Dynamik der Epidemie) auswirkt, wurde bisher nicht untersucht. Ein Hinweis für ein schnelleres Wachstum könnte die verkürzte Zeitspanne von der ersten bis zur letzten infizierten Fläche in einer Region sein. Diese Phase soll sich laut Simulation bis 2100 um 10 Tage reduzieren (RICHERZHAGEN ET AL., 2011).

3 Material & Methode

3.1 Die Felddatenanalyse

3.1.1 Die Beschreibung der Felddaten

Unter Felddaten werden in dieser Arbeit Befallserhebungen aus Zuckerrüben-Sortenversuchen und Monitoringstandorten zusammengefasst. Diese wurden im Rahmen der Erstellung und Validierung von vier Prognosemodellen (CERC BET, ERYBET, UROBET und RAMUBET) für die Zuckerrüben-Blattkrankheiten *Cercospora*, Mehltau, Rost und *Ramularia* erhoben. Der überwiegende Teil der Bonituren wurde von der ZEPP (Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz, Bad Kreuznach) in Rheinland-Pfalz und Hessen durchgeführt. In den Jahren 2007 bis 2009 gab es zusätzlich jeweils einen Sortenversuch in Niedersachsen, der vom Projektpartner IfZ (Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen) betreut wurde. Insgesamt standen somit 175 Standort-Sorten-Jahre zur Verfügung, die sich aufgrund ihres Standortes ($n = 18$), der eingesetzten Sorte ($n = 35$) und dem Versuchsjahr ($n = 9$) unterschieden. Es bestand somit eine hohe Datenvariabilität. Die genaue Verteilung in den 9 Jahren (2000 bis 2009 außer 2006) ist in Abbildung 3 dargestellt. Es wurden nur Daten von unbehandelten Beständen genutzt, damit ausschließlich der natürliche Befallsverlauf ohne Fungizideinfluss analysiert werden konnte.

Die Erhebungen der Befallssituation in den Zuckerrübenbeständen wurden in wöchentlichem Abstand an 7 bis 14 Terminen in der Saison zwischen Juni und Oktober durchgeführt. Sie erfolgte nach der „100-Blatt-Rupfmethode“ (JÖRG & KRAUTHAUSEN, 1996), bei der von insgesamt 100 Zuckerrüben jeweils 1 Blatt aus dem mittleren Blattapparat bezüglich des Befalls und seiner Befallsstärke bonitiert wird. Die Methode impliziert, dass an jedem Termin 100 verschiedene Blätter bzw. Zuckerrüben untersucht werden, da keine Markierung von Einzelpflanzen durchgeführt wurde. Die Einschätzung der Befallsstärke bei der Bonitur erfolgt bis 1 % Befallsstärke in Schritten von 0,1 %. Von 1 bis 10 % erfolgte die Skalierung in Stufen von 0,5 oder 1 %. Von 10 bis 100 % wurde die Befallsstärke in Schritten von 1 % bonitiert. Bei hohen Befallsstärken wurde bevorzugt in 5 % Stufen geschätzt, so dass Werte der Fünferreihe dominieren. Zusammen konnten alle drei Blattkrankheiten maximal 100 % erreichen, d.h. ein Überwachsen der Krankheiten war nicht möglich.

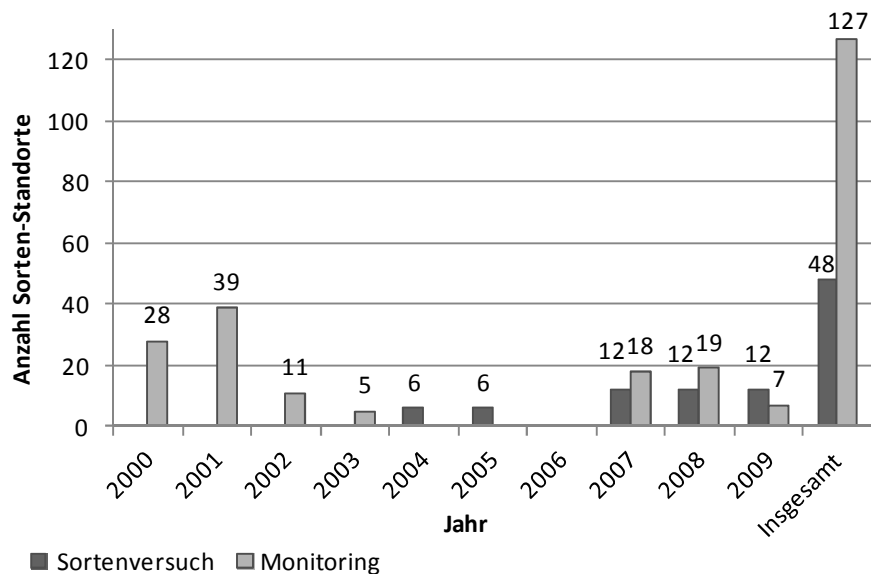


Abb. 3. Die **Anzahl und Verteilung der Sorten-Standorte** über 9 Versuchsjahre. Die Aufteilung erfolgt nach Monitoring (hellgrau) und Sortenversuchen (dunkelgrau).

3.1.2 Die Auswertung der Felddaten

Die Auswertung der Felddaten wurde unter zwei Gesichtspunkten durchgeführt. Die Analyse der Befallshäufigkeiten (BH%) hat das Ziel festzustellen, wie sich die Krankheiten im Bestand entwickeln. Es können somit Aussagen darüber gemacht werden, welche Krankheit im Zuckerrübenbestand dominiert, welche Bedeutung Mischinfektionen haben und welche Kombinationen im Feld am häufigsten anzutreffen sind. Zusätzlich kann anhand der Befallshäufigkeit festgestellt werden, in welcher Reihenfolge die Krankheiten im Bestand auftraten. Diese Analyse zeigt auf, welche Krankheit in der Saison einen zeitlichen Vorsprung gegenüber den anderen pilzlichen Schaderregern hatte, um das Zuckerrübenblatt zu besiedeln.

Neben dem Zeitpunkt der Besiedlung ist im weiteren Verlauf der Saison die Entwicklung der Befallsstärke (BS%) von Interesse. Diese wurde in Hinblick auf die Kombinationen der Krankheiten analysiert, um einen möglichen Einfluss der Interaktion auf den Epidemieverlauf und die Epidemiestärke über die gesamte Saison festzustellen. Die Daten zur Befallsstärke dienen in weiteren Untersuchungsschritten als Basis für die Vergleichsanalyse zwischen Feld- und Laborerhebungen. Die eingesetzten Methoden der mittleren *AUDPC*-Werte (*Area under disease progress curve*) und der täglichen Wachstumsraten (r_d) werden in Abschnitt 3.3.3 und 3.3.4 ausführlich beschrieben.

Um einen Überblick über die Entwicklung der drei Blattkrankheiten im Feld zu erhalten, werden in den Kapiteln 4.1.1.3 und 4.1.2.2 exemplarische Verläufe der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke

für Cercospora, Mehltau und Rost dargestellt. Damit die gesamte Spannweite der Monitoringdaten sichtbar wird, wurden auf Basis der beobachteten Endbefallsstärke solche Epidemien ausgewählt, die die minimal und die maximal zu erreichenden Krankheitsverläufe repräsentieren. Um eine Vergleichbarkeit der Monitoringdaten zu erhalten, wurde als zusätzliches Auswahlkriterium eine Sorte gewählt, die in möglichst vielen Jahren angebaut wurde und bei der alle drei Blattkrankheiten vorhanden waren. Für jede Krankheit wurden drei Beispiele verwendet: (1) Die Befallsverläufe der Sorte Tatjana in den Jahren 2000 bis 2003 und (2) die Daten der Sorte Felicita in den Jahren 2007 bis 2009. (3) In den Versuchsjahren 2004 und 2005 gab es keine Sorte bei der alle drei Blattkrankheiten auftraten. In diesen beiden Jahren wurden deshalb unterschiedliche Sorten (Modus, Marietta und Alabama) genutzt, um den Verlauf der Krankheiten zu dokumentieren.

Die mathematische Beschreibung der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke erfolgte unter Verwendung der logistischen Anpassung, die in Abschnitt 3.3.1 erklärt wird und ebenfalls zur Charakterisierung der Epidemien der Klimaschrankversuche eingesetzt wurde. Um eine einheitliche Zeitachse zu erhalten, wurde der Befallsverlauf in Tagen nach dem 15. Juni verwendet.

3.1.3 Die Analyse der Befallshäufigkeit

Für die Fragestellung der Befallskombinationen mit verschiedenen Krankheiten wurden aus dem gesamten Datenpool ausschließlich kranke Blätter, die von mindestens einer bis maximal drei der zu untersuchenden Krankheiten (Cercospora, Mehltau und Rost) befallen waren, untersucht. Somit standen insgesamt 89.445 Einzelblattbonituren für eine Auswertung zur Verfügung. Für die Einzelblattbonitur wurden insgesamt sieben Klassen der Befallssituation definiert (Tab. 2), die sich in der Anzahl und der Kombination der einzelnen Krankheiten unterscheiden. Die ersten drei Klassen fallen in die Kategorie mit der gewählten Bezeichnung *Solo-Variante*, d.h. dass nur eine einzige Krankheit auf dem Blatt vorhanden war. Hier lassen sich die Fälle „Solo Cercospora“ (Solo C), „Solo Mehltau“ (Solo M) und „Solo Rost“ (Solo R) unterscheiden.

Tab. 2. Die **Zusammenfassung der Einzel- und Kombinationsvarianten** für die drei zu untersuchten Blattkrankheiten Cercospora, Mehltau und Rost.

Kombination der einzelnen Krankheiten	Bezeichnung
Einzelvariante Cercospora	Solo C
Einzelvariante Mehltau	Solo M
Einzelvariante Rost	Solo R
Kombination Cercospora und Mehltau	Duo CM
Kombination Cercospora und Rost	Duo CR
Kombination Mehltau und Rost	Duo MR
Kombination Cercospora, Mehltau und Rost	Trio CMR

Tab. 3. Die **Zusammenfassung der 25 zeitlichen Reihenfolgen der drei Krankheiten** Cercospora, Mehltau und Rost. Unterscheidungskriterien waren dabei die Anzahl der Krankheiten und bei Blättern mit drei vorhandenen Krankheiten das gleichzeitige oder aufeinander folgende Auftreten. Der untere Tabellenabschnitt zeigt die Gruppierung der vier Kategorien, die aus den 25 Reihenfolgen gebildet wurden. Abk.: x = Krankheit nicht vorhanden.

Anzahl der Krankheiten		Position in der Reihenfolge		
	Nr.	Cercospora	Mehltau	Rost
1 Krankheit	1	1	x	x
	2	x	1	x
	3	x	x	1
2 Krankheiten	4	1	2	x
	5	2	1	x
	6	x	1	2
	7	x	2	1
	8	2	x	1
	9	1	x	2
	10	1	1	x
	11	x	1	1
	12	1	x	1
3 Krankheiten mindestens 2 Krankheiten treten gleichzeitig auf	13	1	1	1
	14	1	2	2
	15	2	1	2
	16	2	2	1
	17	2	1	1
	18	1	2	1
	19	1	1	2
3 Krankheiten alle 3 Krankheiten treten zeitlich hintereinander auf	20	1	2	3
	21	1	3	2
	22	2	1	3
	23	3	1	2
	24	2	3	1
	25	3	2	1
Kategorie	Zusammenfassung folgender Kombinationen aus dem oberen Tabellenteil (Nr.)			
1. Cercospora zuerst	1, 4, 9, 14, 20, 21			
2. Mehltau zuerst	2, 5, 6, 15, 22, 23			
3. Rost zuerst	3, 7, 8, 16, 24, 25			
4. 2 oder 3 Krankheiten gleichzeitig	10, 11, 12, 13, 17, 18, 19			

Die nächsten drei Klassen werden unter dem Begriff *Duo-Variante* zusammengefasst. Dazu zählen die Varianten „Cercospora und Mehltau“ (Duo CM), „Cercospora und Rost“ (Duo CR) und „Mehltau und Rost“ (Duo MR). Die siebte Klasse umfasst ausschließlich die *Trio-Variante* „Cercospora, Mehltau und Rost“ (Trio CMR). Diese Einteilung wurde gewählt, um die Rolle der einzelnen Interaktionspartner allein und in Kombination bewerten zu können. Jede Blattkrankheit ist in insgesamt drei der sieben

Klassen vertreten: eine Solo-Variante, zwei Duo-Varianten (mit jeweils einer der beiden anderen Krankheiten) und die Trio-Variante.

Für die Analyse der zeitlichen Reihenfolge des Auftretens der drei Blattkrankheiten wurden insgesamt 25 verschiedene Kombinationen unterschieden (Tab. 3), je nachdem ob eine, zwei oder drei Krankheiten während der Saison im Bestand vorhanden waren. Ein weiteres Einteilungskriterium war, ob die Krankheiten gleichzeitig oder hintereinander auftraten. Um die Analyse nach der zeitlichen Reihenfolge zu vereinfachen, wurde im Anschluss an die sehr feine Aufschlüsselung der Fälle, eine Zusammenfassung in vier Kategorien durchgeführt (unterer Abschnitt Tab. 3). Drei der vier Klassen wurden nach der ersten Krankheit, die im Bestand auftrat, klassifiziert (*Cercospora* zuerst, Mehltau zuerst, Rost zuerst). Jede dieser Kategorien enthielt sechs der 25 verschiedenen Reihenfolgen. Die vierte Klasse fasste die restlichen sieben verschiedenen Reihenfolgen zusammen, bei denen entweder zwei oder drei Krankheiten gleichzeitig auftraten.

3.1.4 Die Analyse der Befallsstärke

Die sieben Klassen der Einzel- und Kombinationsvarianten (Tab. 2) wurden auch in der Analyse der Befallsstärke eingesetzt. Diese Einteilung wurde als Basis genutzt, um in einem weiteren Schritt die erreichten Befallsstärken der einzelnen Blattkrankheiten zu klassifizieren. Für jede der drei Krankheiten wurde somit eine zweite Kategorisierung durchgeführt, die jeweils sechs Befallsstärkeklassen umfasst (Tab. 4). Die Einteilung erfolgt in Anlehnung an das Boniturschema, welches in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde. Mit dieser Einteilung konnte zusätzlich zu der Aussage über die Anzahl der Interaktionspartner eine Angabe über die Befallsstärke in der jeweiligen Einzel- oder Kombinationsvariante gemacht werden.

Neben dieser detaillierten Einzelblattanalyse wurde auch die Entwicklung der Befallsstärke der einzelnen Zuckerrübenbestände über die gesamte Zuckerrübensaison analysiert. Um die zur Verfügung stehenden Daten zu vereinheitlichen, wurde die zu betrachtende Phase auf den Boniturzeitraum zwischen dem 15. Juni und dem 15. September eines Jahres festgelegt. Boniturtermine, die davor oder danach lagen, wurden nicht in die Datenanalyse einbezogen. Damit ein Vergleich mit den im Labor erhobenen Daten durchgeführt werden konnte, wurden die Boniturdaten von einer wöchentlichen Einheit auf eine tägliche Einheit umgerechnet. Zur weiteren Bewertung der Befallsstärke wurde die Berechnung der mittleren *AUDPC*-Werte und der täglichen Wachstumsraten genutzt, deren Berechnung in den Kapiteln 3.3.3 und 3.3.4 beschrieben wird.

Tab. 4. Die **Einteilung der Befallsstärke für die drei Blattkrankheiten** Cercospora, Mehltau und Rost in sechs Befallsklassen.

Befallsklasse	Intervall der Befallsstärke
1	0,1-1 %
2	>1-10 %
3	11-25 %
4	26-50 %
5	51-75 %
6	76-100 %

3.2 Die Durchführung und Analyse der Klimaschrankversuche

3.2.1 Die Sortenwahl und Anzucht der Jungpflanzen

In den Versuchen wurde die Zuckerrübensorte *Donella* (Züchter: KWS SAAT AG) eingesetzt. Sie zeichnet sich durch eine hohe Anfälligkeit gegenüber Cercospora (BSA Note 5 bis 6) und Mehltau (BSA Note 6 bis 7) aus (BSA, 2007; 2011). Durch die Wahl einer anfälligen Sorte gegenüber den Krankheiten Cercospora und Mehltau kann der Einfluss von Sortenresistenzen in der Untersuchung der Interaktion vernachlässigt werden. Eine Bewertung der Rostanfälligkeit für Zuckerrüben und somit für die Sorte *Donella* wird vom Bundessortenamt nicht durchgeführt. Eine Aussage über die Anfälligkeit für diese Krankheit ist demzufolge nicht möglich.

Die Jungpflanzen wurden in wöchentlichem Abstand ausgesät und in Viereckhohtöpfen (Firma Meyer; Volumen 0,88 l) mit einem Gemisch aus Topfsubstrat (Stender Topfsubstrat mittlere Struktur E510 mit Langzeitdünger fein) und Glaser Quarzsand (Verhältnis 5:1) im Gewächshaus für sechs bis neun Wochen angezogen. Nach dieser Anzuchtphase waren zwischen sechs und 12 Laubblätter ausgebildet. Für die Versuche wurden jeweils homogene Gruppen (Zuckerrüben von einem bis zwei Aussaatterminen) gebildet. Diese wurden vor dem Versuch, dem Blattalter entsprechend, von außen nach innen markiert, um eine Einzelblattbonitur durchführen zu können.

3.2.2 Die Beschreibung der Klimaschrankversuche

Für die Interaktionsversuche wurden Cercospora und Rübenmehltau ausgewählt, die beiden dominierenden Krankheiten in Zuckerrübenbeständen. Der Rübenrost spielt hingegen nur eine untergeordnete Rolle in deutschen Anbaugebieten und wird durch die prognostizierte Klimaerwärmung weniger in den Fokus rücken als die beiden wärmeliebenden Blattkrankheiten. Die Kombination mit drei Interaktionspartnern wird, basierend auf den Ergebnissen für Cercospora und

Mehltau, als theoretischer Ansatz in dieser Arbeit simuliert. Somit können verschiedene Szenarien mit Rübenrost bewertet werden. Die Beschreibung der Szenarien befindet sich in Abschnitt 3.4.5.

Der Schwerpunkt der Klimaschrankversuche wurde auf die Inkubationszeit und die daraus resultierende Entwicklung der Befallsverläufe für die beiden Blattkrankheiten gelegt.

3.2.2.1 Der Versuchsaufbau

In einem ersten Schritt wurden die beiden Blattkrankheiten unabhängig voneinander erforscht. In dieser Arbeit wird die Versuchsform als Solo-Variante mit Cercospora (Solo C) oder Mehltau (Solo M) bezeichnet. Das Krankheitsauftreten und der Verlauf wurden dabei für drei Temperaturstufen (15, 20 und 25 °C) untersucht. Ziel war es, den Einfluss des Parameters Temperatur auf die Krankheit (Inkubationszeit, Wachstumsrate, Kapazität) zu bestimmen. Jede Temperaturstufe wurde mindestens einmal durchgeführt, die Versuchsbezeichnungen sowie die Anzahl der bonitierten Blätter sind Tabelle 5 zu entnehmen. Die Ergebnisse zum Erstauftreten (Inkubationszeit) wurden im Anschluss mit Literaturdaten von DRANDAREVSKI (1969b) für Mehltau und von BLEIHOLDER & WELTZIEN (1972a) für Cercospora verglichen.

Tab. 5. Die **Zusammenfassung der Solo-Varianten** für **Cercospora (a)** und **Mehltau (b)** für die drei Temperaturstufen (15, 20 und 25 °C) mit der in dieser Arbeit verwendeten Abkürzung und der mittleren Anzahl der Blätter je Zuckerrübe.

Tab. 5a	Temperaturstufe			
	15 °C	20 °C		25 °C
Cercospora	15_Juli_2011	20_Juli_2011	20_Mai_2011	25_Juli_2011
Anzahl Zuckerrüben insgesamt	4	4	4	4
Anzahl Blätter insgesamt	21	22	32	31
mittlere Anzahl Blätter je Zuckerrübe	5,25	5,5	8	7,75

Tab. 5b	Temperaturstufe		
	15 °C	20 °C	25 °C
Mehltau	15_Juni_2010	20_Mai_2010	25_Aug_2010
Anzahl Zuckerrüben insgesamt	4	4	4
Anzahl Blätter insgesamt	24	22	37
mittlere Anzahl Blätter je Zuckerrübe	6	5,5	9,25

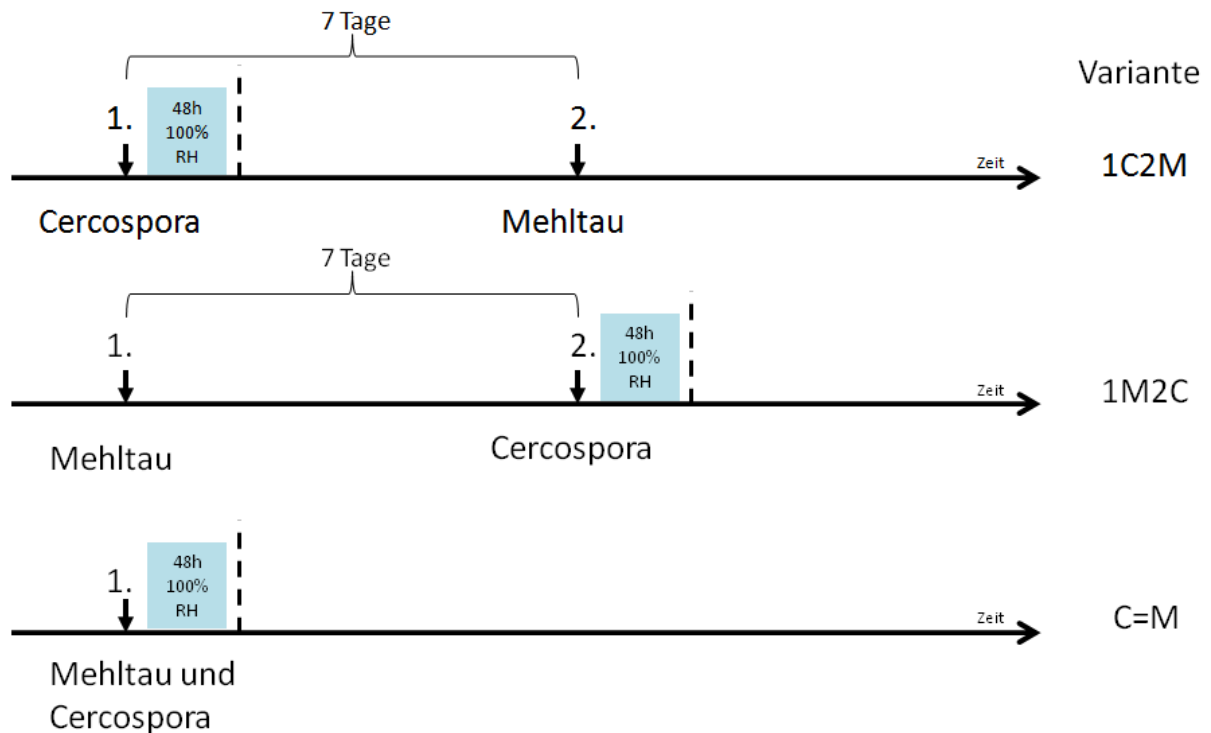


Abb. 4. **Der Versuchsaufbau der drei Kombinationsvarianten**, die sich im Inokulationszeitpunkt der beiden Blattkrankheiten unterscheiden: Primärinokulation Cercospora und Sekundärinokulation Mehltau (1C2M); Primärinokulation Mehltau und Sekundärinokulation Cercospora (1M2C) und Inokulation von Mehltau und Cercospora gleichzeitig (C=M).

Tab. 6. Die **Anzahl der durchgeführten Einzel- und Kombinationsvarianten** in den fünf Versuchsdurchgängen. (x) bedeutet, dass die Variante in diesem Durchgang nicht durchgeführt wurde.

Temperaturstufe	25°C				
Bezeichnung	Sept_2011_1	Sept_2011_2	Nov_2011	Mrz_2012	Mai_2012
Variante					
Solo C	x	x	1	1	1
Solo M	x	x	1	1	3
1C2M	1	1	1	1	1
1M2C	1	1	1	1	1
C=M	1	1	2	x	1
Anzahl Zuckerrüben insgesamt	12	12	24	16	28
Anzahl Blätter insgesamt	96	98	239	161	271
mittlere Anzahl Blätter je Zuckerrübe	8,00	8,17	9,96	10,06	9,68

In einem zweiten Schritt wurde die Interaktion der beiden Blattkrankheiten Cercospora und Mehltau analysiert. Insgesamt wurden drei Kombinationsvarianten untersucht, die sich durch unterschiedliche Inokulationsabstände für Cercospora (IA_C) und Mehltau (IA_M) definieren (Abb. 4).

Die erste Kombination umfasst die Variante erst Cercospora dann Mehltau (1C2M). Dies bedeutet, dass die Zuckerrüben zuerst mit Cercospora inokuliert wurden und 7 Tage später mit Mehltau. Diese

Variante entspricht der heute hauptsächlich vorkommenden Freilandsituation, in der die Pflanzen primär mit *Cercospora* infiziert sind und eine Sekundärinfektion mit Mehltau folgt. Die zweite Kombinationsvariante ist das genaue Gegenteil von 1C2M. Bei dieser Variante wird die Zuckerrübe zuerst mit Mehltau inokuliert und im Abstand von 7 Tagen mit *Cercospora* (1M2C). Diese Kombination tritt heutzutage im Feld eher selten auf, könnte aber in Zukunft aufgrund des Klimawandels und der damit verbundenen Temperaturerhöhung häufiger vorkommen. Die dritte Variante gibt keiner Krankheit einen zeitlichen Vorsprung für die Besiedlung des Wirtes, d.h. die Zuckerrüben werden mit beiden Krankheiten gleichzeitig inokuliert (C=M). Jedes Versuchsglied der drei Kombinationsvarianten wurde in vierfacher Wiederholung angelegt.

Insgesamt wurden fünf Versuchsdurchgänge von September 2011 bis Mai 2012 durchgeführt. Ab dem dritten Versuchsdurchgang im November wurden, parallel zu den Interaktionsvarianten, erneut Solo-Varianten mit Mehltau (Solo M) und auch *Cercospora* (Solo C) angesetzt. Diese Einzelvarianten wurden dann im Anschluss für die Parameterschätzung des Interaktionsmodells genutzt, da sie den unabhängigen Krankheitsverlauf dokumentieren (RICHTER ET AL., 1988). Die ersten beiden Versuche im September 2011 sind demzufolge nur eingeschränkt auswertbar, da keine Solo-Varianten angelegt wurden. Die Anzahl der Varianten und ihre in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung ist Tabelle 6 zu entnehmen. Zusätzlich zu den Solo-Varianten wurden gesunde Kontrollvarianten mitgeführt um auszuschließen, dass kontaminierte Pflanzen den Beginn des Erstaufretens verfälschten.

3.2.2.2 Die Inokulationsmethode der beiden Blattkrankheiten

Für die Solo- und Interaktionsversuche galten die gleichen Inokulationsbedingungen. Das Inokulummaterial für *Cercospora* stammte von rheinland-pfälzischen Freilandproben aus dem Jahr 2010. Es wurde in eigenen *Cercospora*-Versuchen im Labor vermehrt und als Sammelprobe (10 bis 20 befallene Zuckerrübenblätter) bei -20 °C gelagert. Jeweils eine Probe mit gefrorenen Blättern wurde für den Versuch mechanisch zerkleinert, mit 60 ml destilliertem Wasser versetzt und für 8 Stunden aufgetaut. Nach dem Auftauen wurde der Überstand durch eine Gaze filtriert, um die Sporensuspension von großen Blattresten zu trennen. Insgesamt konnten so ca. 100 ml Suspension gewonnen werden. Mit Hilfe der Thoma-Zählkammer wurde die Anzahl der *Cercospora*-Konidien bestimmt und die Konzentration der Suspension auf 45.000-65.000 Konidien je ml eingestellt. Danach erfolgte eine Sprühinokulation (Gloria® Feinsprüher Typ 137) der Versuchszuckerrüben, die eine komplette Benetzung des Blattapparates mit Konidiensuspension zur Folge hatte. Um optimale Infektionsbedingungen von 100 % RH zu schaffen, wurden die Zuckerrüben für 48 Stunden in feuchte Tüten eingepackt. Die Pflanzen wurden bei konstanten 25 °C und einem Tag-Nacht-Rhythmus von 16/8 Stunden im Klimaschrank (Flohr

Instruments, Typ MKL 1200 oder Rumed, Typ 1201) inkubiert. Danach wurden die Tüten entfernt und die Zuckerrüben unter den vorhandenen Bedingungen für die gesamte Versuchszeit kultiviert.

Das Mehltauinokulum stammte ebenfalls aus Rheinland-Pfalz und wurde in der Saison 2010 im Freiland gesammelt. Um Mehltau zu kultivieren, wurde eine Dauerzucht mit sechs bis zehn Zuckerrüben der Sorte *Donella* betrieben. Die Konidien für die Mehltauinokulation wurden entweder vom befallenen Blattapparat der Zuckerrüben in Dauerkultur abgepinselt oder durch das Klopfen von befallenen Blättern gegeneinander auf die Pflanzen aufgebracht. Aus diesem Grund konnte keine genaue Bestimmung der Inokulumdichte durchgeführt werden. Es wurde darauf geachtet, dass ein ausreichend starker Mehlt austaubelag auf den Versuchszuckerrüben zu sehen war. Bei der Variante C=M wurde die Mehltau-Inokulation unmittelbar nach der Sprühinokulation mit *Cercospora* durchgeführt, wodurch sich der Einfluss des Wassers direkt auf die Konidienkeimung auswirken konnte (JARVIS ET AL., 2002). In den Varianten 1C2M und 1M2C war dieser negative Einflussfaktor zum Zeitpunkt der Inokulation von Mehltau nicht gegeben, da eine Inokulation unter trockenen Bedingungen durchgeführt wurde. Die Zuckerrüben wurden nach der Behandlung mit der jeweiligen Krankheit für die gesamte Versuchsdauer im Temperaturoptimum von 25 °C mit einem Tag-Nacht-Rhythmus von 16/8 Stunden in denselben Klimaschränken, wie die mit *Cercospora* inokulierten Zuckerrüben, inkubiert.

3.2.3 Die Erhebung und Verrechnung der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke

Die Versuche wurden im zwei- bis drei-Tagesrhythmus bonitiert. Neben der Befallshäufigkeit (Anzahl befallener Blätter in Prozent) wurde die mittlere Befallsstärke für jedes Blatt in Prozent (0 bis 100 %) erhoben. Das Boniturschema wurde in Anlehnung an die Felderhebungen durchgeführt (Abschnitt 3.1.1). Der Zeitraum der Bonituren umfasste je nach Krankheitsverlauf zwischen 23 und 40 Tage. Jede Solo- und Kombinationsvariante wurde in vierfacher Wiederholung (vier Einzelzuckerrüben) angesetzt. Bereits befallene Blätter, die während des Versuches abstarben, wurden mit dem zuletzt bonitierten Befallswert bis zum Ende des Versuches weitergeführt, um einen Rückgang der Befallsstärke zu verhindern. Für jeden Boniturtermin wurde die Befallsstärke über alle Blätter je Zuckerrübe gemittelt.

Um den Verlauf des Befalls für alle Versuche (Solo- und Kombinations-Varianten) zu charakterisieren, wurde die Entwicklung der Befallshäufigkeit wie auch die der Befallsstärke mittels logistischer Funktion angepasst (Abschnitt 3.3.1). Die berechneten Anpassungen wurden im Anschluss miteinander verglichen. Vor dem Vergleich der Solo-Varianten der drei Temperaturstufen wurden, unter Verwendung eines mittleren Startwertes, die logistischen Funktionen der Befallsverläufe standardisiert. Erst nach diesem Schritt war eine Gegenüberstellung der Parameterwerte möglich.

Des Weiteren wurden auf Basis der Werte der Befallsstärke, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, jeweils vier *sAUDPC*-Werte je Kombinationsvariante (einer pro Versuchswiederholung) berechnet. Die *AUDPC*-Werte beschreiben die Fläche unter der jeweiligen Befallskurve und sind deshalb eine nützliche quantitative Zusammenfassung der Krankheitsintensität über die Zeit. Damit ein Vergleich zwischen Feld und Labor stattfinden konnte, wurden die *AUDPC*-Werte zusätzlich über die Zeit standardisiert (*sAUDPC*).

Neben der Verwendung der vier Einzelwerte wurde auf Basis der Befallshäufigkeit in einem weiteren Schritt ein Gesamtbefallshäufigkeitswert durch Mittelwertbildung zusammengefasst. Dieser Mittelwert pro Boniturtermin diente als Grundlage für die Parameterschätzung der Interaktionsmodelle. Die Durchführung der Parameterschätzung wird ausführlich in Kapitel 3.4 beschrieben.

Außerdem wurden die gemittelten Befallsstärkewerte je Variante genutzt, um die tägliche Wachstumsrate je Boniturtermin zu ermitteln. Die Berechnung ist in Kapitel 3.3.4 dokumentiert.

3.2.4 Die Untersuchung zum Einfluss eines einmaligen Regenereignisses auf den Befallsverlauf des Rübenmehltaus zur Simulation einer Sprühinokulation

Wie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben, handelt es sich bei Rübenmehltau um einen Ektoparasiten, dessen weißlicher Myzelbelag in Kolonien auf der Blattoberfläche wächst. Das hat den Nachteil, dass im Freiland durch Regeneinfluss oder Reifbildung bereits vorhandener Befall abgewaschen werden kann. Diese Beeinträchtigung führt zu dem Problem des Nichterkennens oder einer Unterschätzung des tatsächlichen Mehлтаubefalls. Es ist demzufolge möglich, dass ein Rückgang des Befalls vorhanden ist und dieser bonitiert wird. Die gleiche Problematik zeigte sich auch während der Interaktionsversuche mit Rübenmehltau und *Cercospora*. Hierbei war insbesondere die Variante 1M2C betroffen, da durch die Sprühinokulation mit *Cercospora* bereits vorhandener Myzelbelag abgewaschen werden konnte. Ein Rückgang der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke war demzufolge möglich.

Um herauszufinden, ob es einen Zusammenhang zwischen Ausgangsbefall (Befallshäufigkeit und Befallsstärke), Zeitpunkt der Wasserbehandlung (in Tagen nach der Inokulation) und dem Befall nach der Inokulation gibt, wurde ein zusätzlicher Versuch zur Abwaschbarkeit von Rübenmehltau, in Anlehnung an das Versuchsdesign der Variante 1M2C, angelegt (vergleiche Abb. 4).

32 Zuckerrüben (238 Blätter insgesamt) wurden gleichzeitig mit Mehлтаu inokuliert und bei konstanten 25 °C im Klimaschrank kultiviert (Tab. 7). Danach wurde im Abstand von 7, 10, 15 und 22 Tagen jeweils eine Gruppe von sieben Zuckerrüben mit 60 ml destilliertem Wasser eingesprüht und für 48 Stunden in feuchten Tüten eingepackt, um die Inokulation mit *Cercospora* zu simulieren.

Tab. 7. Die **Übersicht der verwendeten Versuchspflanzen** nach Inokulationsabstand und die Verteilung der Aussaattermine über die fünf Varianten.

Variante	Abstand	Anzahl Zuckerrüben	Anzahl Blätter	mittlere Anzahl Blätter je Zuckerrübe
1	7 Tage	7	68	9,71
2	10 Tage	7	66	9,43
3	15 Tage	7	57	8,14
4	22 Tage	7	58	8,29
5	Kontrolle	4	38	9,5

Parallel wurde eine unbehandelte Kontrollgruppe mit vier Zuckerrüben über den gesamten Versuchszeitraum von 32 Tagen als Vergleichsgruppe geführt. Die Bonituren der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke erfolgte im zwei bis drei Tagesrhythmus und zusätzlich jeweils 48 Stunden vor und nach der Wasserbehandlung. Die Erhebung und Verrechnung der Befallsentwicklung wurde wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben durchgeführt.

3.3 Die Auswertung der Feld- und Klimaschrankdaten

3.3.1 Die Beschreibung der logistischen Anpassung der gewonnenen Daten aus dem Klimaschrankversuch und der Felddaten

In einem ersten Schritt erfolgte die Modellierung der mittleren Befallshäufigkeit und der mittleren Befallsstärke für alle Solo- und Kombinationsvarianten mit einer logistischen Funktion.

$$y(t) = K / [1 + ((K - y_0) / y_0) * \exp(-r * t)] \quad (15)$$

Die Variable $y(t)$ beschreibt dabei die Befallshäufigkeit oder die Befallsstärke an Tag t . K steht für die Kapazität, also die maximale Befallshäufigkeit bzw. Befallsstärke, y_0 ist der berechnete Anfangsbefall am Tag $t = 0$, r steht für die tägliche Wachstumsrate der logistischen Funktion und t ist die Zeit in Tagen nach der Inokulation. Die logistische Anpassung wurde mit dem Programm SigmaPlot® (Version 10.0.0.54) durchgeführt. Die graphische Umsetzung erfolgt mit Microsoft Excel 2007.

Bei der Variante 1M2C ist zu beachten, dass es aufgrund der feuchten Sekundärinokulation mit *Cercospora* teilweise zu einem reversiblen Rückgang der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke von Mehltau kommen konnte. Durch die zum Teil fallenden Befallsverläufe zu Beginn der Epidemie war für diese Interaktionsvariante eine valide logistische Anpassung unter Verwendung aller Boniturstärken nicht möglich. Deshalb wurde die logistische Anpassung für 1M2C ausschließlich mit den Werten nach der Inokulation mit *Cercospora* durchgeführt ($t > 7$). Dies muss bei Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

3.3.2 Die Sortierung der Felddaten für Vergleichbarkeit mit Klimaschrankdaten

Bevor ein Vergleich zwischen Klimaschrank und Feld durchgeführt werden konnte, mussten die Felddaten einer weiteren Aufbereitung unterzogen werden. In diese Analyse flossen nur Standort-Sorten-Jahre ein, die eine mittlere bis hohe Anfälligkeit gegenüber Cercospora-Blattflecken und eine hohe Anfälligkeit gegenüber Mehltau aufwiesen. In der Bewertung der Sortenanfälligkeit für Cercospora durch das Bundessortenamt bedeutete dies, eine Note von größer oder gleich 4. Für Mehltau musste eine Note von größer oder gleich 5 bezüglich der Anfälligkeit vorliegen. Beide Bedingungen mussten gleichzeitig erfüllt sein, um in den weiteren Analysen eingesetzt zu werden. Grund hierfür war die hohe Anfälligkeit der Versuchszuckerrüben-Sorte *Donella* gegenüber beiden Krankheiten. Nur durch Ausschluss der gering anfälligen Sorten war eine Vergleichbarkeit gewährleistet.

Damit später nicht nur eine Aussage über Klimaschrank und Feld gemacht werden konnte, sondern auch über die einzelnen Kombinationsvarianten (1C2M, 1M2C, C=M), wurde eine weitere Einschränkung vorgenommen. Alle anfälligen Standort-Sorten-Jahre wurden nach der Reihenfolge des Auftretens der Krankheiten sortiert. Somit kamen nur Fälle in die weitere Analyse, die die drei im Versuch eingesetzten Reihenfolgen aufwiesen. Rost war in diesen Fällen entweder überhaupt nicht oder in der Reihenfolge als dritte Krankheit im Bestand vertreten. Bei der Variante C=M im Feld ist zu beachten, dass es sich in dieser Situation nicht um den Inokulationszeitpunkt, sondern um das Erstauftreten handelt, welches zum gleichen Termin stattfand.

Aufgrund der beiden Einschränkungen wurden von den 175 nur 28 Standort-Sorten-Jahre in der weiteren Analyse genutzt. Zehn Fälle davon hatten die Reihenfolge 1C2M für das Erstauftreten der Krankheiten. Die Kombination 1M2C wurde acht Mal repräsentiert und in zehn Fällen traten die Krankheiten gleichzeitig auf (C=M).

3.3.3 Die Berechnung des sAUDPC-Wertes

Der AUDPC-Wert steht für *area under the disease progress curve* bzw. der Fläche unter der Befallskurve. Er ist ein nützliches quantitatives Maß, um die Krankheitsintensität über die Zeit von verschiedenen Jahren, Standorten oder Managementstrategien zu vergleichen. Er wird wie folgt berechnet (CAMPBELL & MADDEN, 1990):

$$AUDPC = \sum_{i=1}^{n-1} [(y_i + y_{i+1})/2](t_{i+1} - t_i) \quad (16)$$

Dabei ist n die Anzahl der Erhebungen, i der Erhebungszeitpunkt, y die Befallsstärke (%) und t_i die Anzahl der Tage nach Boniturbeginn. Der Vorteil der *AUDPC*-Werte ist, dass diese den Krankheitsverlauf während der gesamten Vegetationsperiode widerspiegeln (KAISER, 2007). Da es sich beim *AUDPC*-Wert um eine Summe handelt, wird dieser umso größer, je mehr Boniturtermine in die Bewertung einfließen. Um absolute *AUDPC*-Werte verschiedener Versuche miteinander vergleichen zu können, muss die Versuchszeit gleich groß sein. Da in dieser Arbeit Feldversuche aus unterschiedlichen Jahren mit einer maximalen Dauer von 92 Tagen bewertet wurden und Laborversuche mit einer maximalen Dauer von 40 Tagen durchgeführt wurden, musste eine Standardisierung der *AUDPC*-Werte vorgenommen werden, damit eine Vergleichbarkeit möglich war. Aus diesem Grund wurde *AUDPC* durch die Anzahl der Tage des gesamten Befallszeitraumes geteilt. Somit erhielt man einen standardisierten *AUDPC*-Wert (CAMPBELL & MADDEN, 1990), der die mittlere Befallsstärke während der Epidemie angab.

$$sAUDPC = AUDPC / (t_n - t_1) \quad (17)$$

Dieser *sAUDPC*-Wert konnte nun in Vergleichsanalysen, wie z. B. der Varianzanalyse, eingesetzt werden, damit eine Gegenüberstellung der Befallsverläufe möglich war.

Aus den Klimaschrankversuchen konnten pro Versuchsvariante vier *sAUDPC*-Werte berechnet werden (vier Versuchswiederholungen). Für *Cercospora* standen somit insgesamt 72 Werte zur Verfügung, die im Verhältnis 12 zu 60 die Solo- und Duo-Variante repräsentierten. Für Mehltau gab es zusammengefasst 88 *sAUDPC*-Werte, 60 davon aus den Duo-Varianten und 28 aus der Solo-Variante.

Bei den Felddaten lagen für die Kombinationen 1C2M und C=M jeweils 10 *sAUDPC*-Werte für die Varianzanalyse vor. Die Variante 1M2C war durch 8 Fälle vertreten. Für eine Varianz-Analyse konnten jeweils 28 *sAUDPC*-Werte für *Cercospora* und Mehltau genutzt werden.

3.3.4 Die Berechnung der täglichen Wachstumsrate

Die Grundannahme des LV-Modells beruht auf logistischem Wachstum. Mittels einer logit-Transformation ist es möglich, die logistische Funktion zu linearisieren und die Parameter mit einer linearen Regression zu schätzen (HAU, 2011):

$$\ln(y/(1 - y)) = \ln(y_0/(1 - y_0)) + r_L * t \quad (18)$$

Die logistische Wachstumsrate r_L ist die Steigung der Geraden im transformierten System und kann als Geschwindigkeit der Epidemie interpretiert werden. Für die Kapazität wird in dieser Gleichung der Wert 1 angenommen.

Bei variablen Umweltbedingungen, wie sie im Freiland vorzufinden sind, ist es sinnvoll, keine Wachstumsrate r_L für die gesamte Epidemie zu nutzen, sondern die Rate über kleinere Zeiträume zu berechnen. Mit folgender Gleichung ist es möglich die Wachstumsrate r_d zwischen zwei Terminen zu kalkulieren (HAU, 2011):

$$r_d = [\ln(y_2/(1 - y_2)) - \ln(y_1/(1 - y_1))]/(t_2 - t_1) \quad (19)$$

Mit dieser Gleichung kann eine tägliche Wachstumsrate r_d , die auf den Befallsstärken bzw. Befallshäufigkeiten y_1 und y_2 der Boniturtermine t_1 und t_2 basiert, berechnet werden. Diese Rate kann sowohl für die Felddatenerhebungen als auch für die Laborversuche berechnet werden. Aufgrund der identischen Zeiteinheit ist es möglich, die Geschwindigkeit der Epidemie zu vergleichen.

Aus den 28 Standort-Sorten-Jahren konnten 140 tägliche Wachstumsraten der Befallshäufigkeit und 178 tägliche Wachstumsraten der Befallsstärke für Cercospora-Blattflecken genutzt werden. Für Mehltau lag eine Basis von 113 Einzelwerten für die Befallshäufigkeit und 173 Werte für die Befallsstärke vor, die zur Berechnung der mittleren täglichen Wachstumsrate dienten. Für die Klimaschrankversuche waren für Cercospora 88 Datensätze der Befallshäufigkeit und 135 Befallsstärke-Werte vorhanden. Bei Mehltau waren es 99 Datensätze der Befallshäufigkeit und 156 einzelne tägliche Wachstumsraten für die Befallsstärke. Aufgeteilt auf Solo- und Duo-Varianten lag die Verteilung für Cercospora bei 14 zu 74 Datensätzen und für Mehltau bei 24 zu 75 für die Befallshäufigkeit. Bei der Befallsstärke war das Verhältnis für Cercospora bei 21 zu 114 Datensätzen und für Mehltau bei 53 zu 103 täglichen Wachstumsraten für die Fälle Solo und Duo.

3.4 Die Parameterschätzung

3.4.1 Der Aufbau der Interaktionsmodelle

Als Ausgangspunkt der Interaktionsmodellierung stand die mittlere Befallshäufigkeit bezogen auf alle bonitierten Blätter und die mittlere Befallsstärke je Blatt zur Verfügung. Aufgrund der hohen Robustheit lag der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Merkmal Befallshäufigkeit insbesondere bei der Bewertung der Klimaszenarien. Die Befallsstärke als Grundlage der Modellierung wurde ebenfalls eingesetzt, zeigte aufgrund des geringen Befallsstärkeniveaus von Mehltau in den Kombinationsvarianten jedoch

erhebliche Probleme in der Schätzung der Konkurrenzkoefizienten. Die Parameterschätzung wurde mit der Software ModelMaker Version 4.0 (Firma: Cherwell Scientific Ltd.) durchgeführt. Als Gleichungssystem wurde das modifizierte LV-Modell mit Kombinations- und Einzelvarianten (Differenzialgleichungen (5) bis (8)) eingesetzt:

$$\frac{dy_C}{dt} = r_C y_C (1 - y_C / K_C) \quad \text{Cercospora in der Solo-Variante (20)}$$

$$\frac{dy_M}{dt} = r_M y_M (1 - y_M / K_M) \quad \text{Mehltau in der Solo-Variante (21)}$$

$$\frac{dy_C}{dt} = \max\{0, r_C y_C (1 - [y_C + \alpha_{CM} y_M] / K_C)\} \quad \text{Cercospora in der Duo-Variante (22)}$$

$$\frac{dy_M}{dt} = \max\{0, r_M y_M (1 - [y_M + \alpha_{MC} y_C] / K_M)\} \quad \text{Mehltau in der Duo-Variante (23)}$$

Folgende Modellparameter wurden geschätzt: r_C und r_M als Wachstumsraten für die beiden Krankheiten, K_C und K_M als die Kapazitäten beider Krankheiten in der Solo-Variante und die Konkurrenzkoefizienten α_{CM} (Einfluss von Mehltau auf Cercospora) und α_{MC} (Einfluss von Cercospora auf Mehltau). Des Weiteren wurde der Anfangsbefall der beiden Krankheiten in den vier Varianten geschätzt. In der Einzelvariante von Cercospora ist dies CO_{Solo} und von Mehltau MO_{Solo} . In den Kombinationsvarianten wurde der Anfangsbefall für beide Krankheiten unterschiedlich geschätzt. Für Cercospora wurde in allen Varianten der Anfangsbefall der Solo-Variante verwendet, da sie entweder als erste Blattkrankheit in der Interaktionsvariante vorhanden war (1C2M) oder durch die trockene Inokulation von Mehltau nicht beeinflusst wurde. Im Gegensatz dazu wurde für Mehltau ein zusätzlicher Startwert-Parameter für die Duo-Variante eingeführt (MO_{Duo}). Grund hierfür war in den Varianten 1M2C und C=M der negative Einfluss der Sprühinokulation auf das Mehltaumyzel und in der Variante 1C2M, das fast gleichzeitige Erstauftreten beider Krankheiten, welches sich ebenfalls negativ auf die Ausbreitung des zu bonitierenden Mehltaumyzel auswirkte.

Im Interaktionsversuch Sept_2011 wurden keine Solo-Varianten für Cercospora und Mehltau angelegt. Damit trotzdem eine Auswertung des Versuches möglich war, wurden gemittelte Befallsverläufe für Befallshäufigkeit und Befallsstärke gebildet. Dabei flossen die Solo-Varianten 25_Mrz_2012 und 25_Mai_2012 für Cercospora und 25_Nov_2011, 25_Mrz_2012 sowie 25_Mai_2012_1 für Mehltau ein. Die Ergebnisse des Interaktionsmodells müssen unter Berücksichtigung dieser Annahmen betrachtet werden.

Bei der Variante, in der beide Krankheiten gleichzeitig inokuliert wurden (C=M), laufen die Gleichungen der Kombinationsvariante parallel auf einer Zeitachse. Da die Einzelvarianten ebenfalls zum selben Zeitpunkt starteten, sind alle vier Gleichungen synchron. Bei den Varianten mit unterschiedlichen

Inokulationszeitpunkten (1C2M und 1M2C) lagen die Kombinationsvarianten zeitlich hintereinander. Die Krankheit, die zuerst auf die Pflanze gebracht wurde, galt vor der Sekundärinfektion als „Solo-Variante“, da bis zu diesem Zeitpunkt die zweite Krankheit keinen Einfluss hatte. Erst ab der zweiten Inokulation durfte die Kombinationsvariante als solche bezeichnet werden. Somit wurde vor dem siebten Tag mit der Gleichung (20) oder (21) gearbeitet. Ab Tag sieben galten die Gleichungen (22) oder (23) für die zuerst übertragene Krankheit. Um Schwierigkeiten bei der Approximation zu vermeiden, wurde bei der Variante 1M2C, aufgrund der Abwaschbarkeit des Mehltaumyzels und dem daraus resultierenden Befallsrückgang, erst mit der Sekundärinokulation von *Cercospora* der Befallsverlauf der Duo-Variante Mehltau begonnen. Bei der Variante 1C2M startete der Verlauf der Duo-Variante *Cercospora* bereits zum Termin der Primärinokulation. Die beiden Solo-Varianten blieben bei 1C2M und 1M2C davon unberührt.

Die Krankheit, die als zweites auf die Pflanze gebracht wurde, konnte bis zum Inokulationszeitpunkt als nicht vorhanden betrachtet werden. Erst ab dem Zeitpunkt der Inokulation wurde der Befallsverlauf der Krankheit mit den Gleichungen (22) oder (23) berechnet. Im Programm ModelMaker wurde die Sekundärinokulation durch ein unabhängiges Ereignis modelliert, welches einen nicht periodischen Anstoß, einen sogenannten „Trigger“, auslöste und somit den Wechsel der Gleichungen startete. Zusätzlich wurde mit dem Trigger die Inokulation der zweiten Einzelvariante im Modell bewirkt. Sie lief ab dem Zeitpunkt $t = 7$ parallel zur Kombinationsvariante. Zur Primärinokulation der ersten Krankheit wurde ebenfalls die entsprechende Solo-Variante parallel angesetzt. Die Gleichungen der Einzelvarianten blieben ab dem Zeitpunkt der Inokulation über die gesamte Zeitachse konstant.

Nach der Erstellung des Modells wurde mit der Marquardt-Methode eine Optimierung des Modells durchgeführt, deren Ergebnis die Parameterschätzung darstellte. Insgesamt wurden bis zu neun Parameter gleichzeitig geschätzt.

Bei Verwendung der Befallsstärke als Ausgangspunkt musste bei den Varianten 1C2M und C=M zunächst eine erste Annäherung mit der Simplex-Methode durchgeführt werden, da die alleinige Verwendung der Marquardt-Methode keine geeignete Anpassung lieferte. Nach dieser ersten Annäherung erfolgte die Nutzung der Marquardt-Methode in bis zu vier Schritten, in denen nach und nach immer mehr Parameter gleichzeitig optimiert wurden, bis am Ende alle neun zusammen approximiert werden konnten (Reihenfolge: r , K , yO_{Solar} , yO_{Duo} , a_{MC} , a_{CM}). In vier Fällen musste mindestens ein Parameter fest fixiert werden, da eine gleichzeitige Anpassung aller Parameter auch schrittweise nicht möglich war.

Um eine Aussage über das Optimierungsergebnis zu machen, konnten zum einen der Optimierungsfehler (OF) herangezogen werden, der als Standardfehler (SE) zu verstehen war und die Signifikanz der geschätzten Parameter anzeigte. Als weiteres Kriterium zur Bewertung der Modellgüte stand die Optimierungsstatistik, mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2) und den Residualquadratsummen

(MSR), für die Approximation nach Marquardt zur Verfügung. Nach der Optimierung erfolgte die Integration der Differenzialgleichungen mit der Runge-Kutta-Methode 4. Ordnung. Die Bewertung des Simulationsergebnisses erfolgte graphisch und tabellarisch. Insgesamt konnten fünf Interaktionsversuche (Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012) nach dieser Vorgehensweise analysiert werden. Nach der Schätzung aller Parameter wurde ein Vergleich der Parameter zwischen den drei Kombinationsvarianten mittels ANOVA durchgeführt, um signifikante Unterschiede festzustellen. Die Gegenüberstellung der Konkurrenzkoeffizienten mit einer Situation ohne Konkurrenz ($\alpha = 0$) erfolgte nur für die Ergebnisse auf Basis der Befallshäufigkeit.

3.4.2 Die statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit dem Statistikprogramm XLSTAT Version 2011.1.02 ©Addinsoft 1995-2010 durchgeführt. Die Auswertung der Datenverteilung wurde über eine graphische Darstellung der Daten als Boxplot erreicht.

Die Signifikanz der geschätzten Modellparameter wurde mittels t-Test ($p = 0,05$) überprüft. Als Basis dienten hierfür die jeweiligen Standardfehler (Optimierungsfehler) und die Freiheitsgrade der Parameteroptimierung. Ein Parameter war nicht signifikant von 0 verschieden, wenn die Null im Konfidenzintervall eingeschlossen war.

Um signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Varianten, Versuchsreihen oder Feld- und Klimaschranksituationen festzustellen, wurde die Varianzanalyse (ANOVA) eingesetzt. Als statistischer Test wurde der Tukey-Test ($p = 0,05$) genutzt.

3.4.3 Die Vergleichsanalyse des Interaktionsmodells

Die Vergleichsanalyse wurde unter zwei Gesichtspunkten durchgeführt:

1. Der Einfluss des modifizierten LV-Modells nach WEBER (1992) auf die Interaktion sollte im Vergleich zum klassischen LV-Modell untersucht werden. Hierfür wurden alle betrachteten Fälle einmal mit der Funktion $\max \{...\}$ und einmal ohne diese berechnet. In der graphischen Gegenüberstellung ist das klassische LV-Modell immer links abgebildet und das modifizierte LV-Modell rechts.
2. Das Gewicht der einzelnen Funktionsparameter auf die Interaktion der beiden Blattkrankheiten sollte bewertet werden. Hierbei lag der Fokus auf dem Einfluss des Konkurrenzkoeffizienten (α_{CM} und α_{MC}). Alle Interaktionsvarianten wurden deshalb in zwei Richtungen untersucht. Zum einen Cercospora dominiert über Mehltau ($\alpha_{MC} > \alpha_{MC}$) und zum anderen Mehltau dominiert über

Cercospora ($\alpha_{MC} < \alpha_{MC}$). Diese beiden Ausgangssituationen wurden dann mit drei unterschiedlichen Verhältnissen der Raten zueinander analysiert:

- a. beide Raten sind gleich groß ($r_C = r_M$).
- b. Cercospora hat eine höhere Wachstumsrate als Mehltau ($r_C > r_M$).
- c. Mehltau besitzt eine höhere Wachstumsrate als Cercospora ($r_C < r_M$).

Somit ergaben sich pro Variante 2 x 6 Fälle (Modellwahl x Kombination aus Konkurrenzsituation und Rate), die in der Vergleichsanalyse bewertet werden konnten. Für alle untersuchten Situationen wurden die Kapazitäten mit den Werten $K_C = 100$ und $K_M = 90$ gewählt, damit der Sonderfall eines Gleichgewichtes der Kapazitäten ($K_C = K_M$) ausgeschlossen werden konnte.

Als Ausgangssituation diente in allen drei Varianten der Modellansatz von C=M. Dieser besaß für beide Blattkrankheiten einen Anfangsbefallswert von 0,01 % in den Solo- (CO_{Solo} und MO_{Solo}) und der Duo-Variante (MO_{Duo}). Bei den beiden Kombinationen mit unterschiedlichen Inokulationsterminen (1C2M und 1M2C) wurde deshalb bei der zuerst inokulierten Krankheit der Anfangsbefall in der Solo- und der Duo-Variante von 0,01 auf 0,1 % erhöht. Diese Veränderung hatte zur Folge, dass zum Zeitpunkt der zweiten Inokulation ($t = 7$) die erste Krankheit einen Vorsprung gegenüber der zweiten Krankheit erhielt und somit ein unterschiedlicher Inokulationstermin simuliert werden konnte.

3.4.4 Die Szenarien-Analyse des Interaktionsmodells unter Annahme einer Klimaerwärmung

Mit dem in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Gleichungssystem wurden Parameterschätzungen zu den fünf Versuchen durchgeführt und ausgewertet. Um den Einfluss des Klimawandels auf das Interaktionsverhältnis bewerten zu können, wurden im Anschluss die geschätzten Parametersätze der Versuche Nov_2011 und Mai_2012 für die drei Varianten C=M, 1C2M und 1M2C untersucht. Diese beiden Versuche wurden aufgrund ihrer Vollständigkeit für die Szenarien-Analyse ausgewählt. Es fehlen weder Solo-Varianten wie bei Sept_2011_1 und Sept_2011_2, noch die Kombinationsvariante C=M wie bei dem Versuch Mrz_2012 (vergleiche Tab. 6, Seite 40).

Wie über den Stand der Klimafolgenforschung in Kapitel 2.7 berichtet, wird es von 2021 bis 2050 zu einer Temperatursteigerung von 0,5 bis 1,5 °C kommen und von 2071 bis 2100 zu einer Erhöhung von 1,5 bis 3,5 °C (ANONYMUS, 2008). Dies entspricht einer Steigerung von ca. 6 bis 42 % bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8,3 °C in Deutschland. Um den Einfluss des Klimas auf die Interaktion der Blattkrankheiten zu bewerten, wurde für die Funktionsparameter, in Anlehnung an die geschätzte Temperatursteigerung bis zum Jahr 2100, eine Erhöhung oder Reduzierung der Werte um 10, 20 und 50 % simuliert. Die jeweilige Ausgangssituation erhält das Kürzel (AS). Mit den vier folgenden Herangehensweisen wurden die insgesamt bis zu sieben Fälle analysiert:

1. Einfluss des Klimawandels auf die Wachstumsrate: In einem ersten Schritt wurden die geschätzten Wachstumsraten r_C und r_M durch die im Feld erreichten täglichen Wachstumsraten der Befallshäufigkeiten ausgetauscht (s. Abschnitt 4.1.2.4). Grund hierfür waren die konstanten Temperaturbedingungen (25 °C) im Klimaschrankversuch. Um diesen Einflussfaktor den variablen Umweltbedingungen im Freiland anzupassen, wurde die tägliche Wachstumsrate aus der Felddatenanalyse in das System eingebaut und das Modell erneut berechnet (Fall (1)).
Der Klimawandel könnte zur Folge haben, dass sich die Krankheiten schneller oder langsamer ausbreiten, als es heutzutage der Fall ist. Aus diesem Grund wurden die Wachstumsraten, je nach Ausgangssituation der jeweiligen Blattkrankheit, um 10, 20 und 50 % angehoben oder reduziert, um die Folgen zu analysieren. Diese 3-stufigen Veränderungen werden als Szenarien bezeichnet. Die Berechnung der einzelnen Szenarien wurde nacheinander durchgeführt, damit sich die Effekte nicht gegenseitig aufheben. Für *Cercospora* wird die Szenarien-Analyse der Wachstumsrate als Fall (2) bezeichnet und für Mehltau als Fall (3). Aufgrund der eigenen Ergebnisse der Parameterschätzung wurde als minimaler Grenzwert (r_{min}) die Rate 0,1/Tag festgelegt und als maximale Grenze (r_{max}) ein Wert von 1,2/Tag.
2. Einfluss des Klimawandels auf die Kapazität: Auch dieser Parameter könnte durch den Klimawandel beeinflusst werden. Der Klimawandel könnte durch eine Erwärmung die Zuckerrübenanbausaison verlängern und somit auch das Erreichen von höheren Endbefallsstärken verursachen. Ebenso ist eine Reduktion durch schlechtere Umweltkonditionen denkbar. Demzufolge wurden zwei Fälle der Kapazitätsänderung, je nach Ausgangssituation der Blattkrankheit simuliert. Zum einen eine Erhöhung und zum anderen eine Reduzierung des Endbefalls um 10, 20 und 50 %. Für *Cercospora* wurde die Szenarien-Analyse mit Fall (4) bezeichnet und für Mehltau mit Fall (5). Wie bei der Veränderung der Wachstumsrate (Punkt 1) wurden die Analysen nacheinander durchgeführt, damit keine gegenseitige Aufhebung der Effekte stattfindet. Als Grenzwert nach oben wurde eine Kapazität von 100 % (K_{max} , natürliche Grenze) festgelegt. Die untere Grenze beträgt 70 % (K_{min}) aufgrund der eigenen Ergebnisse der Parameterschätzung.
3. Einfluss des Klimawandels auf den Anfangsbefall: Der Anfangsbefall ist ein Indiz für die Menge des vorhandenen Ausgangsinokulums. Durch den Klimawandel könnte dieser Befall zu- oder auch abnehmen, je nachdem wie die Bedingungen für eine Überwinterung von *Cercospora* unter hiesigem Klimaeinfluss bzw. für die Übertragung des Mehltauinokulums mittels Wind aus Südeuropa vorhanden sind (Anzahl Frosttage). In den Fällen (6) und (7) wird eine Erhöhung bzw. Reduzierung (10, 20 und 50 %) dieses Ausgangsbefalls in Bezug auf den Klimawandel analysiert. Als minimaler Anfangsbefall ($COSolo_{min}$ und $MODuo_{min}$) wird ein Wert von 0,001 % wegen der eigenen Resultate festgelegt. Der maximale Anfangsbefall beträgt 60 % ($COSolo_{max}$ und $MODuo_{max}$).

3.4.5 Das theoretische Interaktionsmodell mit drei Blattkrankheiten

Neben den Interaktions-Versuchen mit zwei Blattkrankheiten konnte zusätzlich ein theoretisches LV-Modell für die drei Blattkrankheiten Cercospora, Mehltau und Rübenrost untersucht werden. Als Beispiel für eine Trio-Variante wurden die drei zeitlichen Reihenfolgen Nr. 14 (1. Cercospora und 2. Mehltau und Rost gleichzeitig, 1C2MR), Nr. 20 (1. Cercospora, 2. Mehltau und 3. Rost, 1C2M3R) und Nr. 21 (1. Cercospora, 2. Rost und 3. Mehltau, 1C2R3M) ausgewählt (vergleiche Abschnitt 3.1.3, Seite 35). Grund hierfür waren die Ergebnisse der Felddaten-Analyse, die unter Abschnitt 4.1.1.2 (Seite 56) beschrieben werden. Als Grundlage diente die Parameterschätzung des Versuchs Mai_2012 der Duo-Variante 1C2M (Abschnitt 4.4.1.2, Tab. 50 und Tab. 51, Seite 118) in der insgesamt neun Parameter (CO_{Solo} , MO_{Solo} , MO_{Duo} , K_C , K_M , r_C , r_M , a_{CM} und a_{MC}) berechnet wurden. Für das theoretische LV-Modell mit drei Blattkrankheiten waren zusätzlich neun Funktionsparameter erforderlich. Dazu gehörten Werte für den Anfangsbefall von Rost in der Solo- und Trio-Variante (RO_{Solo} und RO_{Trio}), ein Wert für die Kapazität von Rost in der Solo-Variante (K_R) und ein Wert für die Wachstumsrate (r_R). Zusätzlich wurden vier Interaktionskoeffizienten benötigt, die zum einen den Einfluss von Rost auf Cercospora (a_{CR}) und Mehltau (a_{MR}) und zum anderen den umgekehrten Effekt von Cercospora auf Rost (a_{RC}) und von Mehltau auf Rost (a_{RM}) beschrieben.

Des Weiteren musste der Inokulationsabstand an die drei untersuchten Reihenfolgen der drei Blattkrankheiten angepasst werden. Ursächlich war hierfür die lange Inkubationszeit von Rost bei hohen Temperaturen, die wie in der Einleitung beschrieben (Abschnitt 2.1) mindestens 16 Tage dauert.

Mehltau hat im Gegensatz dazu die kürzeste Inkubationszeit mit 6 bis 7 Tagen und Cercospora liegt an mittlerer Position mit 9,5 bis 11,6 Tagen. Aus diesem Grund wurde in der Reihenfolge 1C2R3M Rost an Tag 7 gestartet und Mehltau als dritte Krankheit an Tag 24. In der zweiten Reihenfolge 1C2M3R startet Mehltau an Tag 14 und Rost an Tag 21. Im dritten Fall 1C2MR wurde der Start von Rost an Tag 7 und Mehltau an Tag 18 simuliert, damit das Erstauftreten ungefähr zum gleichen Termin eintritt. Die verwendeten Parameter können aus Tabelle 8 entnommen werden. Der gewählte Anfangsbefall von Solo R wurde auf 0,04 % gesetzt, da somit eine Befallshäufigkeit von 1 % zum Termin des Erstauftretens gewährleistet war. Der Anfangsbefall von Rost in der Trio-Variante stellt den halbierten RO_{Solo} -Wert dar, weil eine Interaktion laut Literatur (VOLLMER, 2005) für die Kombination „biotroph-nekrotroph“ negative Folgen für den biotrophen Teil hat (s. Seite 23). Die Kapazität von Rost wurde gleich der Kapazität von Mehltau gesetzt, damit beide biotrophen Blattkrankheiten im Endbefallsniveau gleichgestellt sind. Die Wachstumsrate von Rost wurde als langsamste Entwicklungsrate der drei Pilze festgelegt, da Rost die längste Inkubationszeit aufweist und im Gegensatz zu Mehltau und Cercospora bei 25 °C keine optimalen Temperaturbedingungen für seine Ausbreitung vorfindet.

Tab. 8. Die **Eingabeparameter** für das **theoretische Interaktionsmodells** der drei untersuchten **Trio-Varianten** (1C2R3M, 1C2M3R und 1C2MR).

Parameter	1C2R3M	1C2M3R	1C2MR
Anfangsbefall Solo (RO_{solo}) (%)	0,04	0,04	0,04
Anfangsbefall Trio (RO_{Trio}) (%)	0,02	0,02	0,02
Kapazität (K_R) (%)	71	71	71
Wachstumsrate (r_R) (1/Tag)	0,2	0,2	0,2
Konkurrenzkoefizient (Einfluss Rost auf Cercospora) (α_{CR})	0,03	0,03	0,03
Konkurrenzkoefizient (Einfluss Rost auf Mehltau) (α_{MR})	0,2	0,1	0,15
Konkurrenzkoefizient (Einfluss Cercospora auf Rost) (α_{RC})	0,4	0,4	0,4
Konkurrenzkoefizient (Einfluss Mehltau auf Rost) (α_{RM})	0,1	0,2	0,1
Inokulationsabstände Rost (IA_R)/Mehltau (IA_M) (Tage)	7/24	14/21	7/18

Die Konkurrenzkoefizienten wurden in Anlehnung an die Koeffizienten des Versuches Mai_2012 angepasst. Der Einfluss von Rost auf Cercospora hat in allen drei Fällen den niedrigsten Wert der vier neuen Koeffizienten und ist dem Einfluss von Mehltau auf Cercospora gleichgestellt, um den Einfluss von biotroph auf nekrotroph widerzuspiegeln. Dies gilt auch für den Einfluss von Cercospora auf Rost. In diesem Fall besitzt der Koeffizient jedoch den größten Wert, da Cercospora sich nekrotroph ernährt. Der Effekt von Rost auf Mehltau ist in der Variante 1C2R3M höher als der von Mehltau auf Rost. In den Varianten 1C2M3R und 1C2MR hat Mehltau einen größeren Einfluss als Rost. Mit dieser Wahl fließt der frühere Inokulationszeitpunkt der jeweiligen Krankheit in das Modell mit ein. Dieser bietet bei der Kombination „biotroph-biotroph“ laut Literatur (VOLLMER, 2005) der zuerst etablierten Krankheit einen Vorteil für die Interaktion.

4 Ergebnisse

4.1 Die Ergebnisse der Felddatenanalyse

4.1.1 Die Analyse der Befallshäufigkeit

4.1.1.1 Die Häufigkeit der einzelnen Krankheiten in den Solo- und Kombinationsvarianten

Für die Frage „welche Krankheit dominiert in den befallenen Beständen“ wurden insgesamt 89.445 kranke Blätter analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass *Cercospora* die dominierende Krankheit in den untersuchten Beständen war (Abb. 5). Bei 73,7 % der befallenen Blätter wurde *Cercospora* vorgefunden. Der größte Anteil fiel dabei auf die Solo-Variante mit 37 %. Dieser Fall hatte im Vergleich zu den anderen sechs Kategorien den höchsten Einzelanteil. Die Krankheit trat mehr als doppelt so häufig auf wie der zweitgrößte Anteil, die Solo-Variante Mehltau mit 15,9 %. Der Rübenmehltau nahm im Vergleich zu den anderen beiden Blattkrankheiten die mittlere Position ein. In insgesamt 44,3 % der untersuchten Blätter aller Kombinationen wurde Mehltau bonitiert. Rübenrost hingegen hatte die geringste Bedeutung der drei Krankheiten. Er wurde bei 35,1 % der Fälle festgestellt und hatte im Vergleich der Solo-Varianten den geringsten Anteil mit nur 5,2 %. Rost war demzufolge deutlich häufiger in Kombinationsvarianten vorhanden als in der Solo-Variante. Neben den Solo-Varianten, die insgesamt einen Anteil von 58,2 % ausmachten, waren die Kombinationsvarianten mit 41,8 % vertreten. 30,5 % entfielen dabei auf die Duo-Varianten und 11,3 % auf die Trio-Variante.

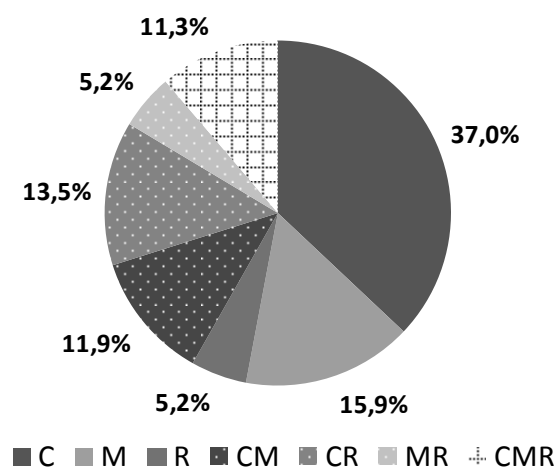


Abb. 5. Die Verteilung der drei Krankheiten *Cercospora* (C), Mehltau (M) und Rost (R) in den Solo-Varianten C, M, R (ohne Muster), den Duo-Varianten CM, CR und MR (gepunktet) und der Trio-Variante CMR (kariert) an den 89.445 kranken Blättern.

Bei den Duo-Varianten lagen die Kombinationen Cercospora-Rost (CR) mit 13,5 % und Cercospora-Mehltau (CM) mit 11,9 % auf einem Niveau. Die Variante Mehltau-Rost hatte im Gegensatz dazu nur einen Anteil von 5,2 % und war somit nicht halb so oft vertreten wie die anderen beiden Kombinationen mit Cercospora.

4.1.1.2 Die zeitliche Reihenfolge der drei Blattkrankheiten

Als Datenbasis dienten die 175 Standort-Sorten-Jahre der Felddatenerhebung. Insgesamt konnten 25 Kombinationen unterschieden werden, die in vier Kategorien zusammengefasst wurden (s. Abschnitt 3.1.3). Bei den ausgewerteten Bonituren konnte festgestellt werden, dass Cercospora in 68,6 % der Fälle die erste Blattkrankheit (Kategorie 1) in den Zuckerrübenbeständen war (Abb. 6). Sie hatte somit einen zeitlichen Vorsprung in der Besiedlung des Wirtes und dadurch einen Vorteil gegenüber den anderen beiden Krankheiten. Bei Mehltau (Kategorie 2) wurde in 7,4 % und bei Rübenrost (Kategorie 3) in 6,9 % der Fälle die Krankheit als erstes im Bestand festgestellt. Bei 17,1 % der Standort-Sorten-Jahre wurden zwei oder sogar drei Krankheiten gleichzeitig im Bestand beobachtet (Kategorie 4).

Die häufigste Reihenfolge der Krankheiten war die Kombination erst Cercospora, dann Rübenrost und als letzte Krankheit der Mehltau (Reihenfolge Nr. 21, s. Tab. 3., Seite 36). Insgesamt 32,0 % der Fälle zeigten diese Aufeinanderfolge. An zweiter Position lag die Reihenfolge: erst Cercospora und dann gleichzeitig Rost und Mehltau (Nr. 14). Diese Kombination konnte in 15,4 % der Fälle beobachtet werden. Einen ähnlich hohen Anteil mit 12,6 % nahm die Reihenfolge, erst Cercospora, dann Mehltau und zum Schluss Rost, ein (Nr. 20). Der vierte Rang ging an die Kombination Cercospora und Rost

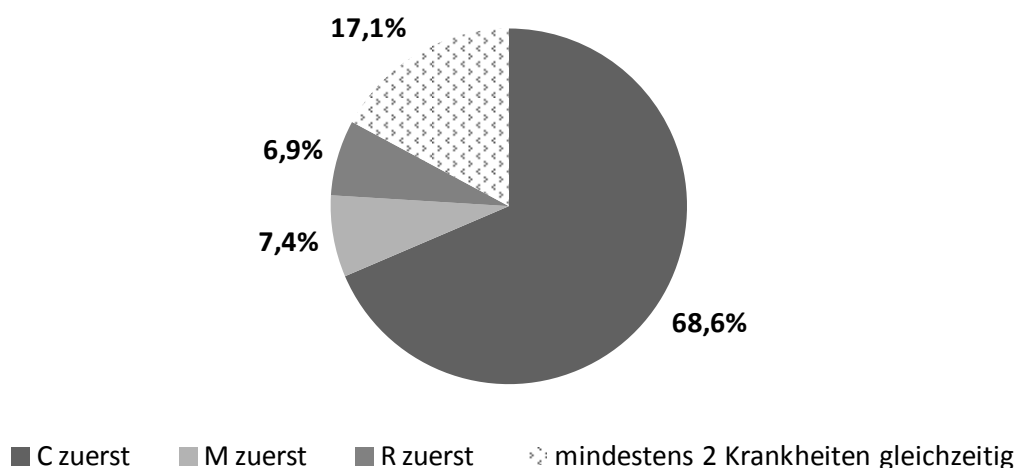


Abb. 6. Der **Anteil der Krankheiten, die zuerst im Zuckerrübenbestand auftraten** (175 Standort-Sorten-Jahre): Cercospora zuerst (dunkelgrau), Mehltau zuerst (hellgrau), Rost zuerst (mittelgrau), mindestens zwei Krankheiten gleichzeitig (weiß mit Muster).

gleichzeitig, gefolgt von Mehltau als letzte Krankheit (Nr. 18). Diese Reihenfolge wurde in 8,0 % der Fälle beobachtet. Cercospora dominierte demzufolge deutlich in der zeitlichen Reihenfolge vor Rübenrost und Rübenmehltau.

4.1.1.3 Die exemplarischen Verläufe der Befallshäufigkeit der Felddaten

Anhand der hier dargestellten Beispiele für die Befallsverläufe der Befallshäufigkeit zeigt sich, dass Cercospora und Mehltau bei den Epidemien mit der geringsten Befallshäufigkeit (Abb. 7a, c und e) deutlich mehr Zuckerrüben im Bestand befielen als die schwächste Krankheit Rost. Für Cercospora variierten die geschätzten Kapazitäten zwischen 26,96 und 100 %, bei Mehltau konnten nur zwei der drei Befallsverläufe valide approximiert werden mit einer maximalen Befallshäufigkeit von jeweils 100 % und für Rost lagen die geschätzten Werte bei 2,5 und 26 % (Tab. 9).

Die Rate der Krankheiten zeigte sich bei Cercospora und Mehltau sehr gleichmäßig zwischen den einzelnen Versuchsjahren. Raten zwischen 0,12 und 0,17/Tag für Cercospora und zwischen 0,11 und 0,18/Tag für Mehltau wurden erreicht. Rost hatte eine enorme Streuung in der Wachstumsrate zu verzeichnen. Hier wurden Raten zwischen 0,08 und 0,60/Tag geschätzt.

Die berechneten Anfangsbefallswerte streuten hingegen bei allen drei Blattkrankheiten sehr stark. Die logistische Anpassung berechnete Werte zwischen $5,88 \times 10^{-16}$ und 0,06 %.

Bei der maximal zu erreichenden Befallshäufigkeit (Abb. 7b, d und f sowie Tab. 10) erlangten alle Beispiele eine Kapazität von 100 %. Im Gegensatz zu den geschätzten Anfangsbefallswerten zeigten die Wachstumsraten über alle drei Blattkrankheiten nur eine geringe Streuung von 0,10 bis 0,29/Tag. Über alle Beispiele des Anfangsbefalls hat Mehltau mit 3,47 % den höchsten Wert und Rost den geringsten Wert mit $1,03 \times 10^{-6}$ %.

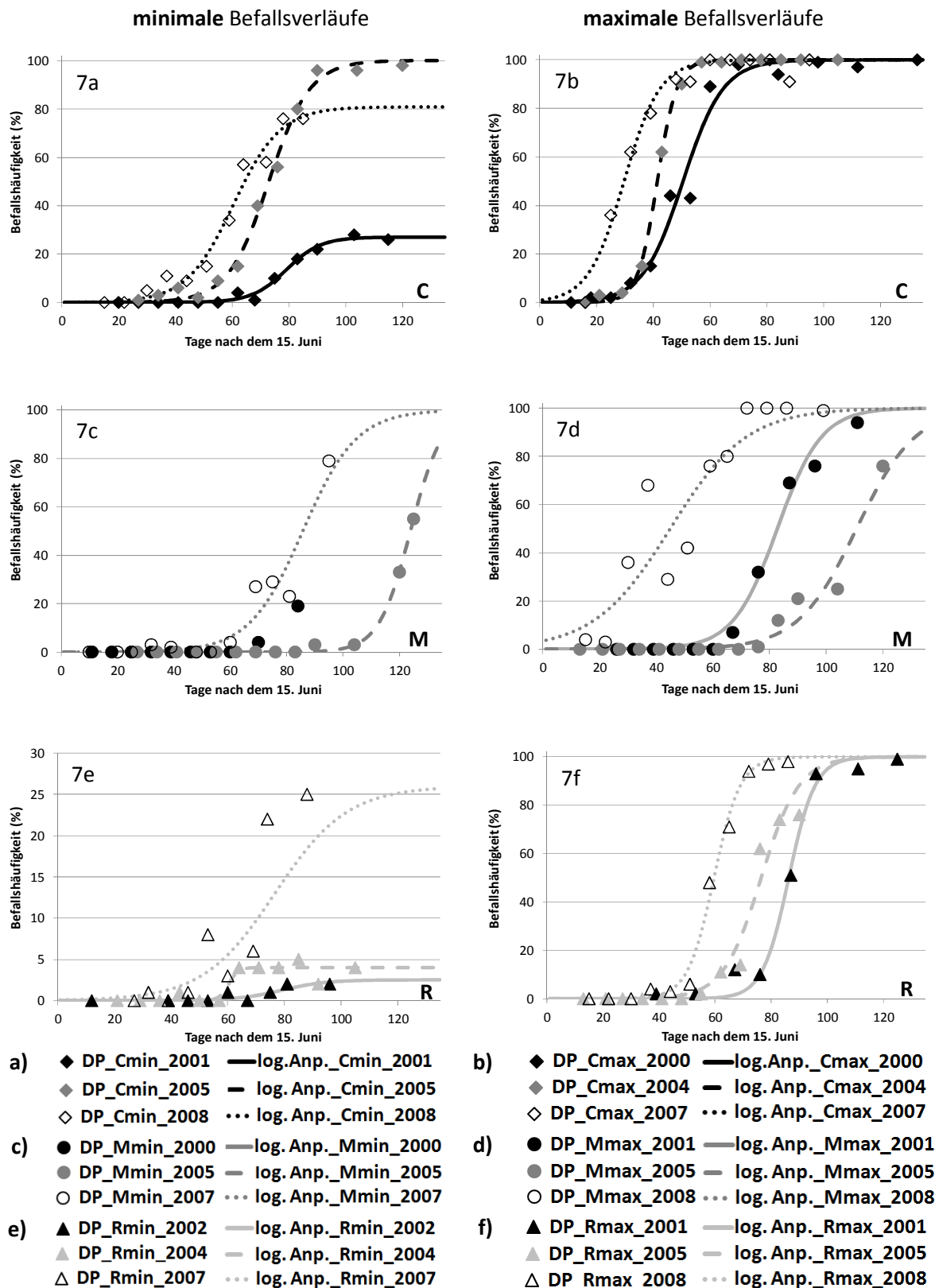


Abb. 7. Jeweils **drei exemplarische Befallsverläufe** der **Befallshäufigkeit** nach dem 15. Juni für **Cercospora** (a, b), **Mehltau** (c, d) und **Rost** (e, f) und die dazu gehörigen logistischen Funktionen. Auf der linken Seite sind die minimal festgestellten Befallsverläufe für die jeweilige Krankheit und auf der rechten Seite die maximal erreichten Befallsverläufe dargestellt. Als Einteilungskriterium diente hierfür die Endbefallsstärke. Achtung: (e) hat eine andere Skalierung der y-Achse. Abk. DP = Datenpunkt

Tab. 9. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der **logistischen Anpassungen** an exemplarische Befallsverläufe der **minimalen Befallshäufigkeit** in den Felddaten von **Cercospora (C), Mehltau (M) und Rost (R)**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, (*) als Grenzwert für die Kapazität festgelegt, da sonst keine valide Anpassung möglich, (**) natürliche Kapazitätsgrenze

Krankheit	Jahr	Standort	Sorte	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
C	2001	Wahlheim (RP)	Tatjana	$5,41 \times 10^{-5}$	$9,88 \times 10^{-5}$	0,596	26,96	1,060	<0,0001	0,17	0,024	<0,0001	0,993
	2005	Nordheim (HE)	Marietta	0,004	0,003	0,275	100**	2,435	<0,0001	0,14	0,012	<0,0001	0,997
	2008	Wintersheim (RP)	Felicita	0,05	0,073	0,473	80,95	6,706	<0,0001	0,12	0,024	0,001	0,989
M	2000	Monsheim (RP)	Tatjana	keine valide Anpassung möglich									
	2005	Nordheim (RP)	Marietta	$2,85 \times 10^{-8}$	$8,34 \times 10^{-8}$	0,740	100**	20,553	0,0007	0,18	0,025	<0,0001	0,999
	2007	Dexheim (RP)	Felicita	0,012	0,042	0,782	100**	47,230	0,063	0,11	0,048	0,058	0,9612
R	2002	Nordheim (HE)	Tatjana	0,0001	0,001	0,867	2,50*	0,765	0,017	0,13	0,080	0,161	0,899
	2004	Nordheim (HE)	Alabama	$5,88 \times 10^{-16}$	$3,36 \times 10^{-13}$	0,999	4,00*	0,357	<0,0001	0,60	10,043	0,954	0,923
	2007	Albig (RP)	Felicita	0,06	0,404	0,880	26,00*	43,183	0,566	0,08	0,108	0,490	0,722

Tab. 10. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der **logistischen Anpassungen** an exemplarische Befallsverläufe der **maximalen Befallshäufigkeit** in den Felddaten von **Cercospora (C), Mehltau (M) und Rost (R)**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, (*)als Grenzwert für die Kapazität festgelegt, da sonst keine valide Anpassung möglich (**), natürliche Kapazitätsgrenze

Krankheit	Jahr	Standort	Sorte	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
C	2000	Gimbsheim (RP)	Tatjana	0,08	0,096	0,426	100**	3,422	<0,0001	0,14	0,024	0,0002	0,989
	2004	Nordheim (HE)	Modus	0,0006	0,0003	0,100	100**	0,537	<0,0001	0,29	0,013	<0,0001	0,999
	2007	Wintersheim (RP)	Felicita	0,89	0,641	0,198	100**	2,153	<0,0001	0,16	0,024	0,0001	0,988
M	2001	Monsheim (RP)	Tatjana	0,003	0,004	0,515	100**	5,674	<0,0001	0,13	0,019	0,0001	0,993
	2005	Nordheim (RP)	Alabama	0,002	0,007	0,726	100**	34,00	0,013	0,10	0,029	0,007	0,979
	2008	Wintersheim (RP)	Felicita	3,47	3,99	0,408	100**	13,485	0,004	0,13	0,019	<0,0001	0,921
R	2001	Sprendlingen (RP)	Tatjana	$1,03 \times 10^{-6}$	$3,97 \times 10^{-6}$	0,806	100**	4,019	<0,0001	0,21	0,045	0,005	0,994
	2005	Nordheim (HE)	Alabama	0,0012	0,0066	0,864	100**	30,05	0,045	0,15	0,076	0,146	0,960
	2008	Wintersheim (RP)	Felicita	0,0003	0,0005	0,561	100**	3,104	<0,0001	0,21	0,028	<0,0001	0,996

4.1.2 Die Analyse der Befallsstärke

4.1.2.1 Die Verteilung der Blattkrankheiten in verschiedenen Befallsstärkeklassen

Die befallenen Blätter der drei Krankheiten wurden, entsprechend ihrer Befallsstärke, in sechs Kategorien eingeteilt. Die genaue Klassifizierung ist in Kapitel 3.1.4 beschrieben. Schaut man sich die Verteilung der drei Krankheiten in Abbildung 8 im Überblick an, so ist eine links schiefe Verteilung zu erkennen. Die größten Anteile für Cercospora, Mehltau und Rost machen dabei die beiden Klassen mit den geringsten beobachteten Befallsstärken 0,1 bis 1 % und >1 bis 10 % aus.

Bei Cercospora lag der Anteil für die erste Klasse bei 46,1 %. Knapp die Hälfte der untersuchten Blätter hatte eine Befallsstärke unter 1 %. In der zweiten Klasse waren 31,6 % der befallenen Blätter vorhanden. Zusammengefasst waren 77,7 %, der durch Cercospora geschädigten Blätter, mit einer Befallsstärke von maximal 10 % befallen. Zuckerrübenblätter mit einem höheren Cercospora-Befall (>11 %) waren deutlich weniger oft vertreten (22,3 %), als solche mit einer geringen Befallsstärke.

Bei Mehltau lag, im Gegensatz zu Rost und Cercospora, der höchste Anteil mit 31,5 % in der zweiten Befallsstärkeklasse. In der ersten Klasse waren 14,8 % der befallenen Blätter vertreten. Die anderen vier Befallsstärkeklassen zeigten im Vergleich zu Cercospora und Rost, die gleichmäßigste Verteilung über alle sechs Befallsstärkeklassen.

Für Rübenrost lag der Anteil für die erste Klasse (0,1 bis 1 %) bei 73,1 %. In der zweiten Klasse (>1 bis 10 %) hatte Rost einen Anteil von 24,2 %. Insgesamt dominierte Rost mit 97,3 % in den beiden niedrigen Befallsstärkeklassen. Der Rostpilz war über die sechs Befallsklassen im Vergleich mit den anderen beiden Blattkrankheiten am ungleichmäßigsten verteilt. Die dritte bis siebte Klasse (11 bis 100 %) hatte nur einen Anteil von 2,7 %.

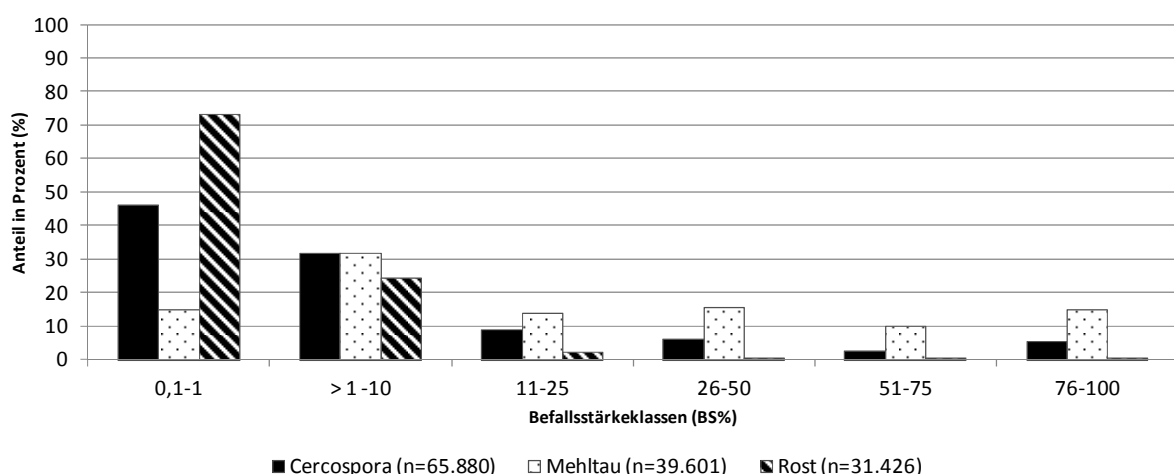


Abb. 8. Die **Verteilung der mit Cercospora (schwarz), Mehltau (weiß mit Punkten) und Rost (weiß-schwarz gestrichen) befallenen Blätter** in den sechs definierten Befallsstärkeklassen (Anteile in Prozent).

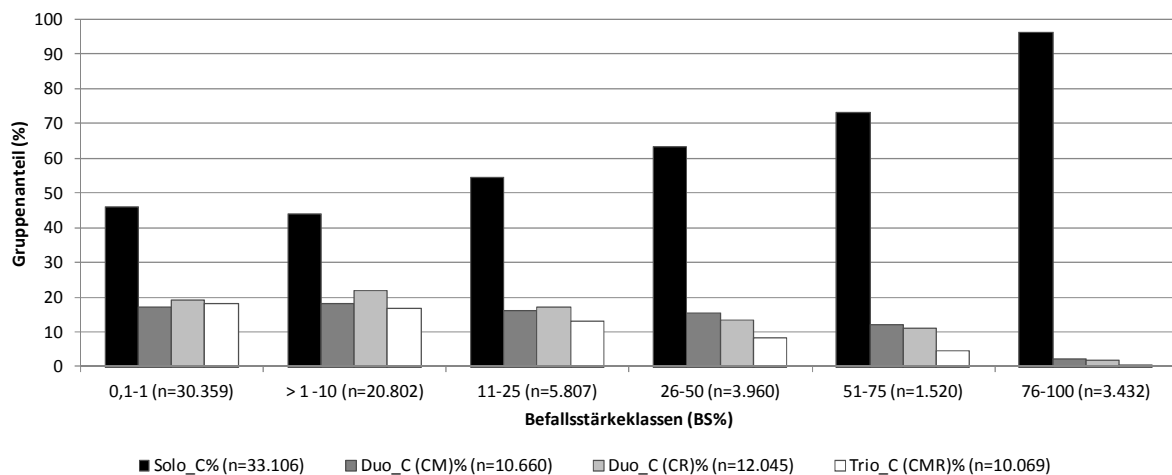


Abb. 9. Der **Vergleich der sechs Befallsstärkeklassen** für die **Cercospora-Blattflecken**. Nach der Einteilung der einzelnen Befallsstärkeklassen wurden die befallenen Cercospora-Blätter ihren Anteilen entsprechend in die vier möglichen Krankheitskombinationen aufgeteilt. Von links nach rechts: Solo-Variante Cercospora (schwarz), Duo-Variante Cercospora/Mehltau (dunkelgrau) und Cercospora/Rost (hellgrau), Trio-Variante Cercospora/Mehltau/Rost (weiß).

Wurde für jede der drei Krankheiten erneut die Einteilung nach den sechs Befallsstärkeklassen gemacht und gruppierte man dann, in einem anschließenden Schritt, die befallenen Blätter zusätzlich entsprechend ihrer Anteile bei den vier möglichen Krankheitskombinationen (s. Kapitel 3.1.3), so erhielt man Informationen über die Einzel- und Kombinationsvarianten.

Für Cercospora zeigte sich dabei in allen Befallsstärkeklassen eine klare Dominanz der Solo-Variante (Abb. 9). Solo C hatte in der geringsten Befallsstärkekategorie (0,1 bis 1 %) einen Anteil von 45,8 %. Die beiden Kombinationsvarianten Cercospora-Mehltau (CM) und Cercospora-Rost (CR) hatten, wie auch die Trio-Variante, einen Anteil von unter 20 %. In den fünf folgenden Befallsstärkeklassen zeigte sich ein ähnliches Bild. Der Anteil der Solo-Variante stieg dabei von Gruppe zu Gruppe an und die Prozentsätze der drei Kombinationsvarianten nahmen ab. In der sechsten Befallsstärkekategorie, die die höchsten Befallsstärken repräsentierte (76 bis 100 %), stieg der Anteil der Solo-Variante auf 96 % an. Die Duovarianten waren in dieser Kategorie mit 2 (CM) und 1,7 % (CR) vertreten. Der Anteil der Trio-Variante lag bei 0,3 %.

Bei der Betrachtung der Daten für Mehltau zeigte sich, im Vergleich zu Cercospora, ein etwas anderes Bild (Abb. 10). Die Solo-Variante hatte in der geringsten Befallsstärkekategorie (0,1 bis 1 %) einen Anteil von 44,5 %. Die Trio-Variante folgte mit 25,4 %. Die Duo-Variante Cercospora-Mehltau (CM) lag an dritter Position mit 20,7 % deutlich vor der Variante Mehltau-Rost (MR) mit 9,4 %. Diese Reihenfolge blieb in den folgenden fünf Befallsstärkeklassen fast vollständig erhalten. Einzige Veränderung war die Zunahme der Duo-Variante CM, die in der letzten Klasse einen Anteil von 31,2 % vorweisen konnte, und die Abnahme der Trio-Klasse auf 18,3 %.

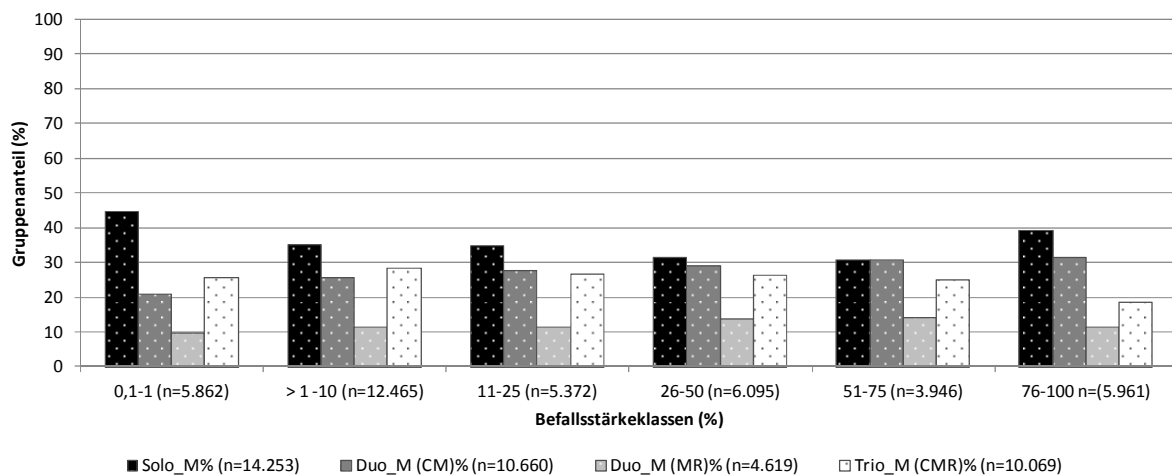


Abb. 10. Der **Vergleich der sechs Befallsstärkekassen** für **Mehltau**. Nach der Einteilung der einzelnen Befallsstärkekassen wurden die befallenen Mehltau-Blätter ihren Anteilen entsprechend in die vier möglichen Krankheitskombinationen aufgeteilt. Von links nach rechts: Solo-Variante Mehltau (schwarz), Duo-Variante Cercospora/Mehltau (dunkelgrau) und Mehltau/Rost (hellgrau), Trio-Variante Cercospora/Mehltau/Rost (weiß).

Im Vergleich zu Cercospora war das Verhältnis der einzelnen Varianten aber über alle Befallsstärkekassen ausgeglichener und stabiler. Eine stark dominierende Solo-Variante war in diesem Fall nicht vorhanden.

Die Daten für Rost zeigten im Vergleich zu den anderen beiden Krankheiten erneut ein anderes Bild (Abb. 11). Beginnend mit der Klasse der geringsten Befallsstärken (0,1 bis 1 %) hatte die Duo-Variante Cercospora-Rost (CR) mit 37,3 % den größten Anteil, gefolgt von der Trio-Variante mit 31,4 %. Die Solo-Variante lag nur auf Rang drei (16,4 %). Die Duo-Variante MR hatte den geringsten Anteil mit 14,9 %. In den folgenden drei Gruppen dominierten ebenfalls die Duo-Variante CR und die Trio-Variante mit Anteilen zwischen 32,7 und 48,5 %, die Kombination MR und Solo R spielten in diesen Fällen keine oder nur eine untergeordnete Rolle (<10 %). Für die letzten beiden Befallsstärkekasse (51 bis 75 %) und (76 bis 100 %) täuschten die hohen Säulen der Trio-Variante (66,7 und 75 %) optisch über die geringe Fallzahl hinweg (n = 19 und n = 4). Im Überblick über die sechs Gruppen ergab sich deshalb auch eine rechts schiefe Verteilung. Zusammenfassend kann über alle sechs Befallsstärkekassen gesagt werden, dass Rost hauptsächlich in Kombinationsvarianten auftrat und die Solo-Variante nur eine untergeordnete Rolle spielte.

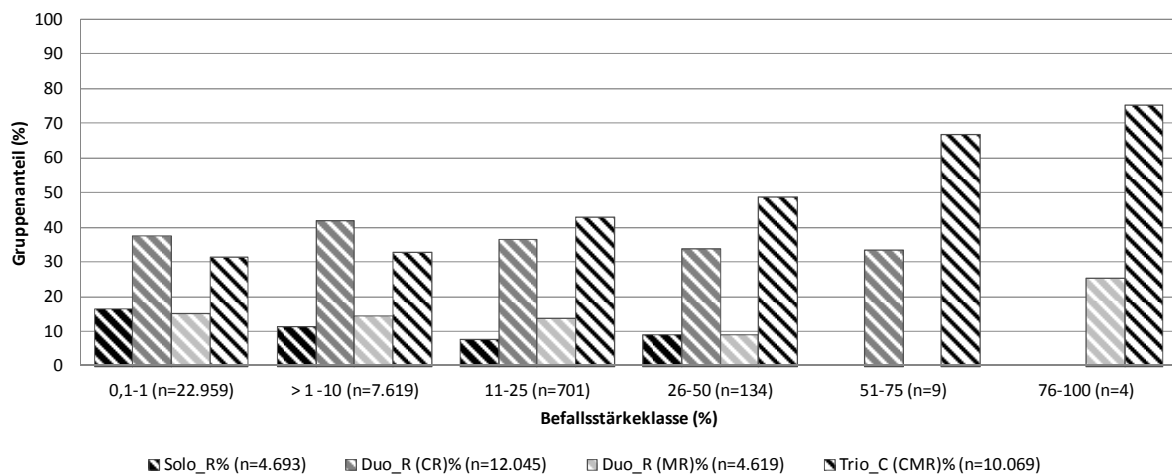


Abb. 11. Der **Vergleich der sechs Befallsstärkeklassen für Rost**. Nach der Einteilung der einzelnen Befallsstärkeklassen wurden die befallenen Rost-Blätter ihren Anteilen entsprechend in die vier möglichen Krankheitskombinationen aufgeteilt. Von links nach rechts: Solo-Variante Rost (schwarz-weiß), Duo-Variante Cercospora/Rost (dunkelgrau-weiß) und Mehltau/Rost (hellgrau-weiß), Trio-Variante Cercospora/Mehltau/Rost (weiß-schwarz).

4.1.2.2 Die exemplarischen Verläufe der Befallsstärke der Felddaten

Betrachtet man die neun Beispiele für die geringste Befallsstärke, die im Feld erreicht wurde (Abb. 12a, c und e), so wurde für Mehltau mit 20,97 % die höchste geschätzte Kapazität erzielt und für Rost die niedrigste mit 0,10 % (Tab. 11). Die Wachstumsraten nahmen Werte zwischen 0,08 und 0,48/Tag an und zeigten, anders als bei der Befallshäufigkeit festgestellt, eine hohe Streuung auf. Eine hohe Variabilität war ebenfalls bei den Schätzungen des Anfangsbefalls zu beobachten. Die Werte lagen zwischen $5,71 \times 10^{-16}$ und 0,001 %.

Bei den maximalen Befallsstärken (Abb. 12b, d und e), die im Feld erlangt werden konnten, hatte Cercospora in allen drei Fällen eine geschätzte Kapazität von 100 % (Tab. 12). Mehltau lag an zweiter Position mit Kapazitäten von 19,85 bis 74,07 % und Rost erzielte die geringsten Kapazitäten in der logistischen Anpassung mit 1,5 und 10 %. Die Wachstumsraten hatten eine ähnliche Streuung im Vergleich zu den minimalen Befallsverläufen. Hier wurden Werte zwischen 0,08 und 0,46/Tag geschätzt. Auf Basis der Rate konnte kein Unterschied zwischen den drei Krankheiten festgestellt werden.

Der geschätzte Anfangsbefall zeigte eine enorme Variabilität mit Werten zwischen $6,85 \times 10^{-16}$ und 0,01 %. Cercospora hatte dabei die höchsten Anfangsbefallswerte im Gegensatz zu Mehltau und Rost, die nur sehr niedrige Werte vorweisen konnten. Es fiel auf, dass bei den logistischen Anpassungen der Befallsstärke ein Zusammenhang zwischen geschätztem Anfangsbefall und der Rate vorhanden war. Lag ein hoher Anfangsbefall vor, so wurde eine niedrige Rate berechnet und umgekehrt.

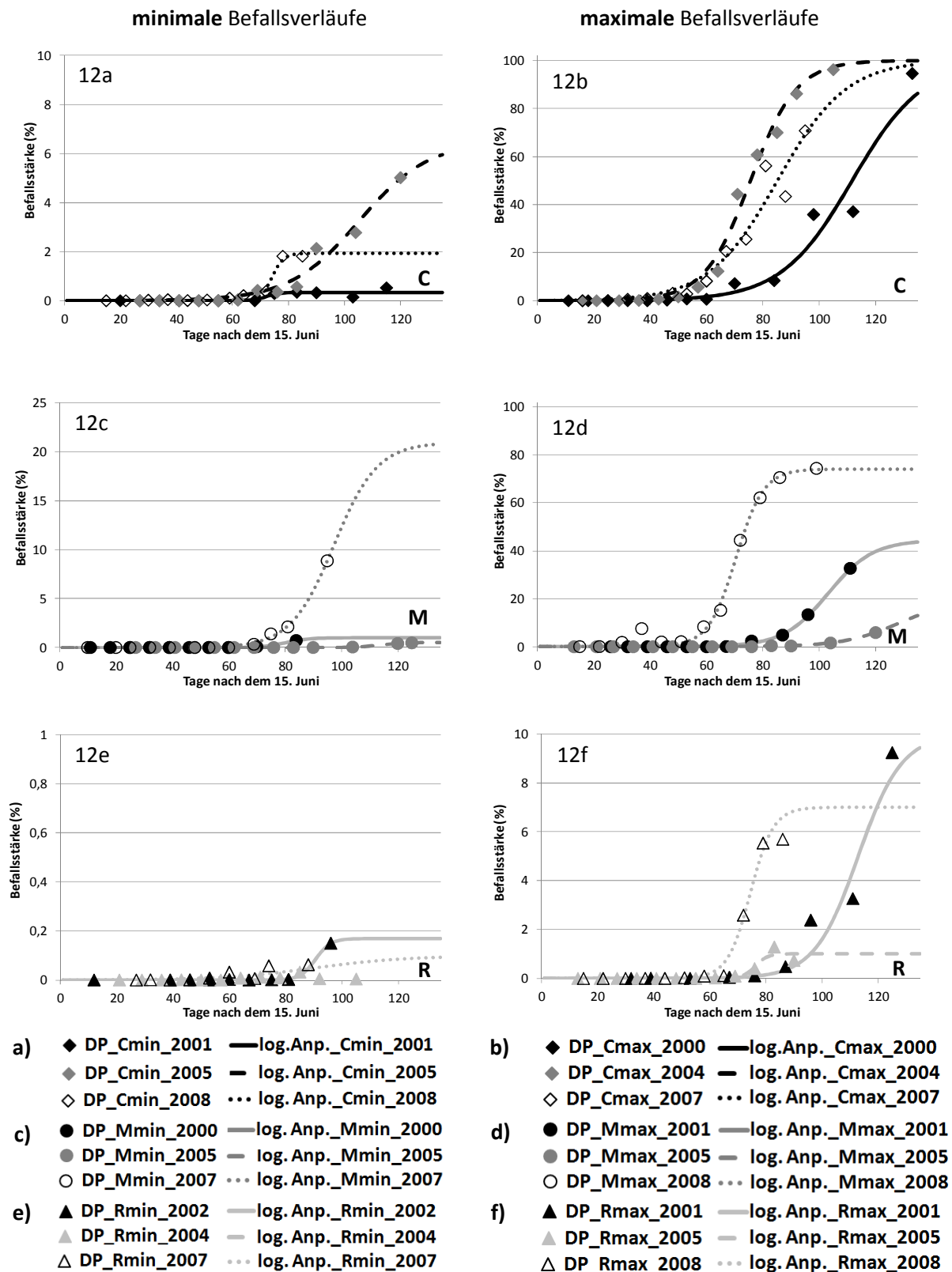


Abb. 12. Jeweils **drei exemplarische Befallsverläufe** der **Befallsstärken** nach dem 15. Juni für **Cercospora (a, b)**, **Mehltau (c, d)** und **Rost (e, f)** und die dazu gehörigen logistischen Funktionen. Auf der linken Seite sind die minimal festgestellten Befallsverläufe für die jeweilige Krankheit und auf der rechten Seite die maximal erreichten Befallsverläufe dargestellt. Als Einteilungskriterium diente hierfür die Endbefallsstärke. Achtung: (a), (c), (e) und (f) haben jeweils eine andere Skalierung der y-Achse. Abk. DP = Datenpunkt

Tab. 11. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der **logistischen Anpassungen** an exemplarische Befallsverläufe der **minimalen Befallsstärke** in den Felddaten von **Cercospora (C)**, **Mehltau (M)** und **Rost (R)**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, (*) als Grenzwert für die Kapazität festgelegt, da sonst keine valide Anpassung möglich (**) natürliche Kapazitätsgrenze

Krankheit	Jahr	Standort	Sorte	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
C	2001	Wahlheim (RP)	Tatjana	$5,71 \times 10^{-16}$	$1,92 \times 10^{-13}$	0,998	0,34	0,045	<0,0001	0,47	4,944	0,998	0,900
	2005	Nordheim (HE)	Marietta	0,001	0,002	0,531	6,51	1,41	0,0012	0,08	0,017	0,0013	0,986
	2008	Wintersheim (RP)	Felicita	$5,38 \times 10^{-16}$	$7,39 \times 10^{-15}$	0,944	1,94	0,115	<0,0001	0,48	0,195	0,0384	0,990
M	2000	Monsheim (RP)	Tatjana	$3,91 \times 10^{-9}$	$9,33 \times 10^{-9}$	0,688	1,00*	0,201	0,002	0,24	0,034	0,0002	0,999
	2005	Nordheim (RP)	Marietta	$3,43 \times 10^{-12}$	$2,15 \times 10^{-13}$	<0,0001	0,52	0,001	<0,0001	0,23	0,001	<0,0001	0,999
	2007	Dexheim (RP)	Felicita	$6,58 \times 10^{-5}$	0,0001	0,545	20,97	11,29	0,096	0,13	0,021	0,0001	0,999
R	2002	Nordheim (HE)	Tatjana	$4,67 \times 10^{-16}$	$3,36 \times 10^{-14}$	0,979	0,17*	0,023	0,0003	0,37	0,449	0,442	0,999
	2005	Nordheim (HE)	Alabama	keine valide Anpassung									
	2007	Albig (RP)	Felicita	0,0004	0,003	0,880	0,10*	0,428	0,822	0,06	0,105	0,579	0,672

Tab. 12. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der **logistischen Anpassungen** an exemplarische Befallsverläufe der **maximalen Befallsstärke** in den Felddaten von **Cercospora (C)**, **Mehltau (M)** und **Rost (R)**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, (*) als Grenzwert für die Kapazität festgelegt, da sonst keine valide Anpassung möglich (**) natürliche Kapazitätsgrenze

Krankheit	Jahr	Standort	Sorte	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
C	2000	Gimbsheim (RP)	Tatjana	0,014	0,036	0,670	100**	20,691	0,0007	0,08	0,025	0,011	0,977
	2004	Nordheim (HE)	Modus	0,009	0,010	0,386	100**	5,029	<0,0001	0,12	0,02	0,0001	0,994
	2007	Wintersheim (RP)	Felicita	0,09	0,181	0,621	100**	45,08	0,0537	0,08	0,029	0,019	0,969
M	2001	Monsheim (RP)	Tatjana	0,0001	0,0001	<0,0001	44,37	3,55	<0,0001	0,13	0,011	<0,0001	0,999
	2005	Nordheim (RP)	Alabama	$5,16 \times 10^{-5}$	$6,65 \times 10^{-5}$	0,454	19,85	13,85	0,180	0,10	0,013	<0,0001	0,999
	2008	Wintersheim (RP)	Felicita	$4,07 \times 10^{-5}$	$7,04 \times 10^{-5}$	0,577	74,07	2,48	<0,0001	0,20	0,025	<0,0001	0,996
R	2001	Sprendlingen (RP)	Tatjana	$4,90 \times 10^{-6}$	$3,41 \times 10^{-5}$	0,890	10,00*	3,265	0,022	0,13	0,066	0,098	0,972
	2005	Nordheim (HE)	Alabama	$6,85 \times 10^{-16}$	$4,15 \times 10^{-14}$	0,987	1,01	0,112	<0,0001	0,46	0,816	0,589	0,948
	2008	Wintersheim (RP)	Felicita	$8,57 \times 10^{-8}$	$3,55 \times 10^{-7}$	0,815	7,00*	0,66	<0,0001	0,24	0,057	0,003	0,989

4.1.2.3 Die *sAUDPC*-Werte der Felddaten

Um die in Kapitel 4.1.1.3 und 4.1.2.2 beschriebenen Befallsverläufe nicht nur beispielhaft zu betrachten, sondern zwischen beiden Blattkrankheiten und den drei Interaktionsvarianten vergleichende Bewertungen durchführen zu können, wurden die *sAUDPC*-Werte berechnet. Stellt man die einzelnen Kombinationsvarianten von *Cercospora* als Box-Plot gegenüber, so zeigten sich zwischen den drei untersuchten Varianten kaum Unterschiede (Abb. 13a). Die *sAUDPC*-Werte innerhalb einer Variante wiesen eine geringe Streuung auf. Als mittlerer *sAUDPC*-Wert errechnete sich für 1C2M der höchste Wert mit 3,36 % (Tab. 13). Die Variante 1M2C hatte den niedrigsten mittleren *sAUDPC*-Wert von 0,96 % und die Variante C=M lag mit 2,42 % an mittlerer Position. Die Varianz-Analyse zeigte zwischen den drei Varianten keine signifikanten Unterschiede der *sAUDPC*-Werte. Demzufolge war die Entwicklung der mittleren Befallsstärke von *Cercospora* in allen Varianten gleich.

Die Box-Plots der *sAUDPC*-Werte für die drei Kombinationsvarianten bei Mehltau zeigten im Vergleich zu *Cercospora* eine größere Variabilität zwischen den einzelnen Varianten auf (Abb. 13b). Die Streuung der Daten war zudem größer als bei der anderen Blattkrankheit. Die *sAUDPC*-Werte für die Variante 1C2M hatte den geringsten Mittelwert mit 13,17 % (Tab. 13). Der umgekehrte Fall 1M2C hatte einen mittleren *sAUDPC*-Wert von 25,69 % und lag damit an mittlerer Position. Die dritte Variante C=M hatte den höchsten Mittelwert mit 30,71 %. Vergleicht man die Kombinationsvarianten von Mehltau untereinander, so unterscheiden sich signifikant nur die Variante 1C2M von C=M.

Die Gegenüberstellung aller Varianten von *Cercospora* und Mehltau zeigte auf, dass Mehltau deutlich höhere *sAUDPC*-Werte erzielte als umgekehrt (Tab. 13). Die Streuung der Daten war bei Mehltau ebenfalls viel höher als bei *Cercospora*. Der mittlere *sAUDPC*-Wert für *Cercospora* lag für die 28 analysierten Felddatensätze bei 2,34 % und für Mehltau bei 23,01 %. Eine durchgeführte Varianz-Analyse mit Tukey-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Krankheiten auf. Im direkten Vergleich dominierte Mehltau über *Cercospora* in der mittleren Summe der Befallsstärke.

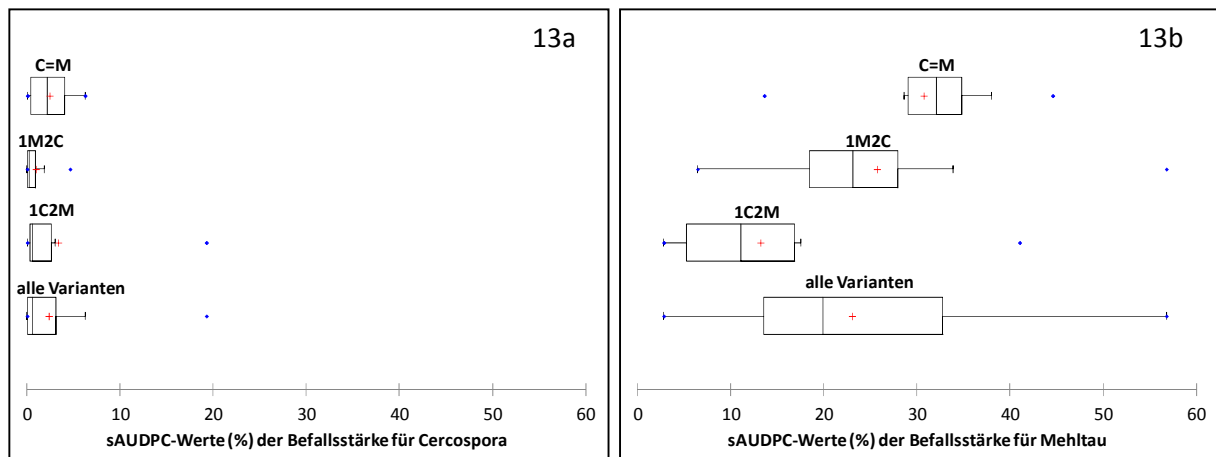


Abb. 13. Die **Box-Plots der sAUDPC-Werte** der Befallsstärke (%) für **Cercospora (a)** und **Mehltau (b)** für die drei untersuchten Varianten **C=M**, **1M2C** und **1C2M** der **Felddatenerhebung** sowie eine Zusammenfassung aller Varianten.

Tab. 13. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **sAUDPC-Werte (%)** von **Cercospora** und **Mehltau** der **Felddaten** in den Varianten **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Der Vergleich der drei Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Der Vergleich Cercospora und Mehltau ist waagerecht in der letzten Zeile dargestellt. Die Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Cercospora			Mehltau	
Variante	sAUDPC-Wert (%)		Variante	sAUDPC-Wert (%)
C=M (n = 10)	2,42a		C=M (n = 10)	30,71a
1C2M (n = 10)	3,36a		1C2M (n = 10)	13,17b
1M2C (n = 8)	0,96a		1M2C (n = 8)	25,69ab
Cercospora (n = 28)			Mehltau (n = 28)	
	2,34b			23,01a

4.1.2.4 Die tägliche Wachstumsrate der Befallshäufigkeiten der Felddaten

Der Vergleich der täglichen Wachstumsraten der Befallshäufigkeit für Cercospora in der Box-Plot Darstellung zeigte (Abb. 14a), dass sich die drei Varianten nur gering voneinander unterschieden. Auch das Ergebnis der Varianzanalyse stellte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten fest (Tab. 14). Die Mittelwerte waren dabei 0,14/Tag für die Varianten C=M und 1M2C sowie 0,18/Tag für die Variante 1C2M.

Bei der Gegenüberstellung der Daten für Mehltau zeigte sich ein ähnliches Bild zwischen den Kombinationen (Abb. 14b). In diesem Fall war die Streuung der täglichen Wachstumsraten, im Vergleich zu Cercospora, größer. Der Tukey-Test besagte, dass alle Raten statistisch gleich waren (Tab. 14). Die Werte variierten dabei zwischen 0,17/Tag (1C2M), 0,18/Tag (1M2C) und 0,21/Tag (C=M).

Vergleicht man die beiden Blattkrankheiten miteinander, zeigte sich für Mehltau eine signifikant höhere Rate (0,19/Tag) als für Cercospora (0,15/Tag) (Tab. 14). Mehltau entwickelte sich im Zuckerrübenbestand demzufolge schneller.

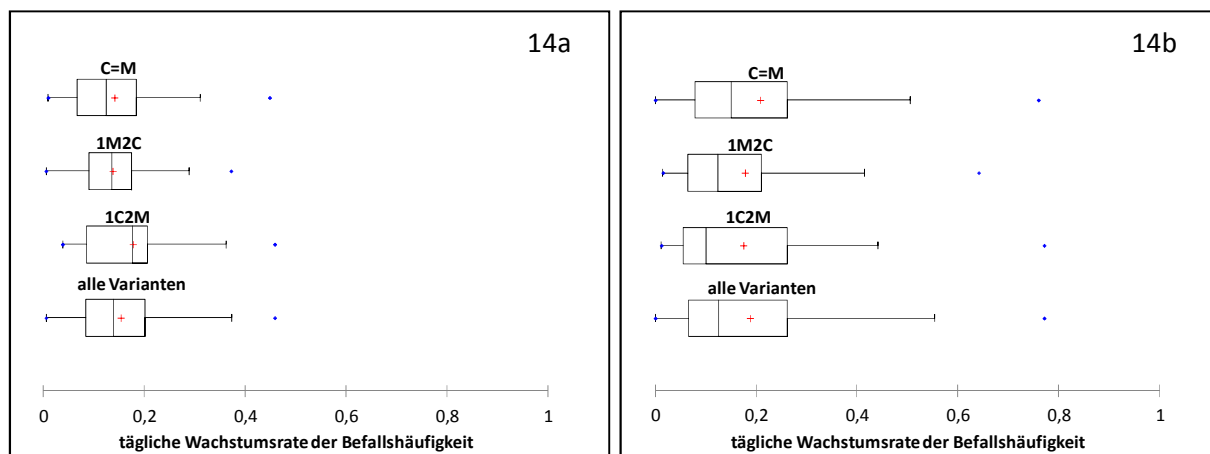


Abb. 14. Die **Box-Plots der täglichen Wachstumsrate der Befallshäufigkeit** für **Cercospora (a)** und **Mehltau (b)** der **Felddatenerhebung** für die drei untersuchten Varianten **C=M**, **1M2C** und **1C2M** sowie die Zusammenfassung aller Raten für die jeweilige Krankheit.

Tab. 14. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **täglichen Wachstumsraten** im **Feld der Befallshäufigkeiten** von **Cercospora** und **Mehltau** in den Varianten **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Der Vergleich der drei Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Der Vergleich Cercospora und Mehltau ist waagerecht in der letzten Zeile dargestellt. Die Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Cercospora (Befallshäufigkeit)			Mehltau (Befallshäufigkeit)	
Variante	tägl. Wachstumsrate		Variante	tägl. Wachstumsrate
C=M (n = 56)	0,14a		C=M (n = 41)	0,21a
1C2M (n = 51)	0,18a		1C2M (n = 38)	0,17a
1M2C (n = 33)	0,14a		1M2C (n = 34)	0,18a
Cercospora (n = 140)	0,15b		Mehltau (113)	0,19a

4.1.2.5 Die tägliche Wachstumsrate der Befallsstärke der Felddaten

Die tägliche Wachstumsrate der Befallsstärke für Cercospora und Mehltau in den verschiedenen Interaktionsvarianten zeigte, bei separater Betrachtung der jeweiligen Krankheit, keine signifikanten Unterschiede (Tab. 15). Dies wurde auch durch den optischen Vergleich der Box-Plots ersichtlich (Abb. 15a und 15b). Die Rate nahm dabei für Mehltau Werte an, die für C=M bei 0,17/Tag, für 1M2C bei 0,20/Tag und für 1C2M bei 0,21/Tag lagen. Für Cercospora variierte der Wert zwischen 0,23/Tag für C=M und 1M2C sowie 0,25/Tag für 1C2M. Vergleicht man Cercospora mit Mehltau in der Entwicklung der Befallsstärke, so konnte sich Mehltau mit einer Rate von 0,23/Tag im Mittel um 17,4 % schneller ausbreiten, als dies bei Cercospora mit einer Rate von 0,19/Tag der Fall war. Demzufolge entwickelte sich Mehltau schneller als Cercospora wie schon zuvor bei der Befallshäufigkeit festgestellt.

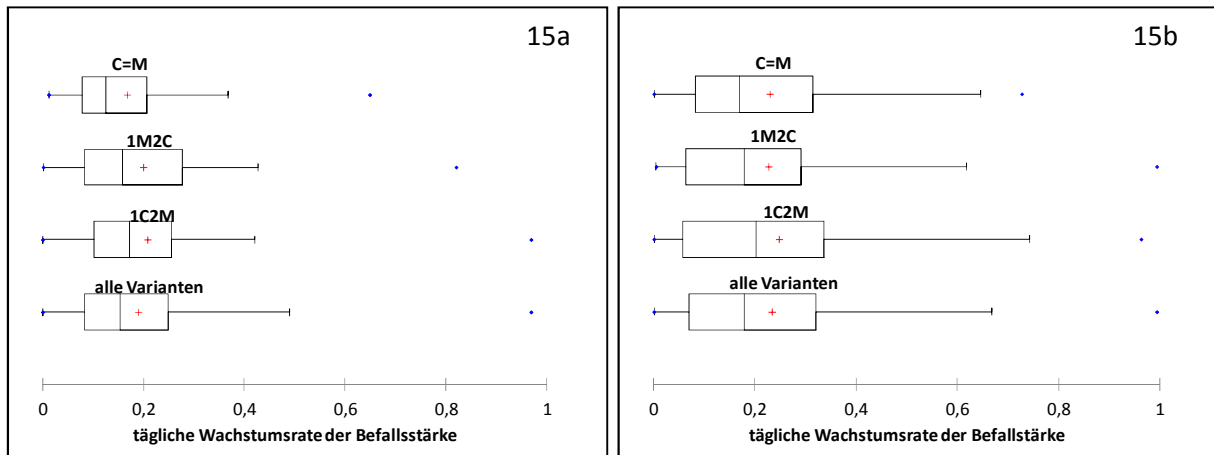


Abb. 15. Die **Box-Plots der täglichen Wachstumsrate der Befallsstärke** für **Cercospora (a)** und **Mehltau (b)** der Felddatenerhebung für die drei untersuchten Varianten **C=M**, **1M2C** und **1C2M** sowie die Zusammenfassung aller Raten für die jeweilige Krankheit.

Tab. 15. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **täglichen Wachstumsraten** im Feld der **Befallsstärken** von **Cercospora** und **Mehltau** in den Kombinationen **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Der Vergleich der drei Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Der Vergleich Cercospora und Mehltau ist waagerecht in der letzten Zeile dargestellt. Die Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Cercospora (Befallsstärke)			Mehltau (Befallsstärke)	
Variante	tägl. Wachstumsrate		Variante	tägl. Wachstumsrate
C=M (n = 72)	0,17a		C=M (n = 66)	0,23a
1C2M (n = 65)	0,21a		1C2M (n = 48)	0,25a
1M2C (n = 41)	0,20a		1M2C (n = 59)	0,23a
Cercospora (n = 178)	0,19b		Mehltau (173)	0,23a

4.2 Die Ergebnisse der Klimaschrankversuche

4.2.1 Die Analyse der Befallshäufigkeiten

4.2.1.1 Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für Cercospora in den Solo-Varianten

Das früheste Erstaufreten von Cercospora wurde 8 Tage nach der Inokulation bonitiert (25_Juli_2011, Abb. 16c) und das spätestes Erstaufreten nach 15 Tagen (15_Juli_2011, Abb. 16a). Die mittleren Befallshäufigkeiten, die zum Termin Erstaufreten bonitiert wurden, lagen zwischen 2,38 % (25_Nov_2011, Abb. 16c) und 18,18 % (20_Juli_2011, Abb. 16b). Der geschätzte Anfangsbefall der logistischen Anpassung variierte zwischen 0,002 und 0,41 % (Tab. 16). Dabei hatten die Versuche bei 25 °C, im Vergleich zu den beiden niedrigeren Temperaturstufen, den geringsten Anfangsbefall. Die Zunahme der Befallshäufigkeit vom Erstaufreten bis zur Kapazität lief für alle Temperaturstufen über einen Zeitraum von mindestens 10 bis maximal 33 Tage.

Die geschätzten Wachstumsraten lagen zwischen 0,28 und 0,97/Tag (Tab. 16). Zwischen den Wachstumsraten für 15 bzw. 20 °C und den Raten für 25 °C zeigte sich ein Anstieg für die höchste Temperaturstufe. Die Geschwindigkeit der Krankheit nahm demzufolge mit zunehmender Temperatur zu, was der Vergleich der Kurvenverläufe in Abbildung 16d zum Ausdruck bringt. Auch der standardisierte Vergleich unter Verwendung des mittleren Anfangsbefalls (0,09 %) zeigte diese Tendenz auf (Tab. 17). Bei 15 °C wurde nur eine Rate von 0,31/Tag erreicht, bei 25 °C wurden hingegen Werte zwischen 0,48 und 0,67/Tag geschätzt.

Die Kapazitäten nahmen in der logistischen Anpassung Werte zwischen 77,69 und 99,29 % an (Tab. 16). Im Vergleich der drei Temperaturstufen konnte kein Unterschied der maximalen Befallshäufigkeit festgestellt werden, dies wurde auch durch die Standardisierung der logistischen Anpassungen mittels Verwendung des mittleren Anfangsbefalls festgestellt (Tab. 17). Die Werte variierten zwischen 78,69 und 99,61 %.

Von den geschätzten Parametern hatten die Werte des Anfangsbefalls insgesamt die geringste Signifikanz. Die Kapazitäten wiesen im Vergleich die höchste Signifikanz auf. An mittlerer Position lagen die Wachstumsraten.

Das Bestimmtheitsmaß der sieben Anpassungen variierte zwischen 0,966 und 0,999 (Tab. 16). Dadurch zeigte sich, dass der Verlauf der Zunahme der Befallshäufigkeit mit dem Modellansatz der logistischen Regression sehr gut erklärbar war.

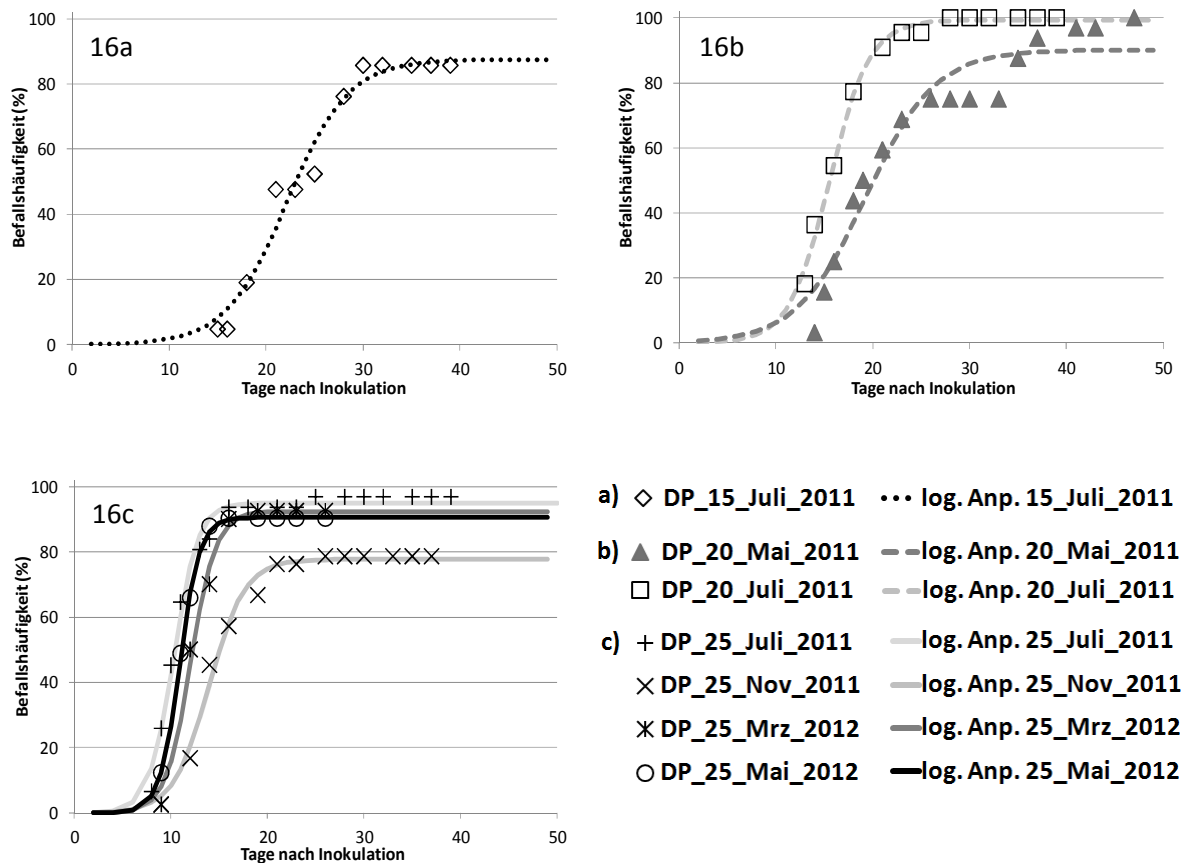


Abb. 16. **Der Verlauf der Befallshäufigkeit für *Cercospora* in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) nach der Inokulation für drei verschiedene Temperaturstufen in der Solo-Variante.** Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) **15 °C (a), 20 °C (b) und 25 °C (c)**, sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt.

Tab. 16. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der sieben **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** der **Solo-Varianten** von **Cercospora**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}_{25}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter bei 25°C, $\bar{x}$ = Mittelwert über alle Temperaturstufen für y_0 , SD = Standardabweichung

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juli_2011	0,08	0,085	0,376	87,55	3,435	<0,0001	0,32	0,050	0,0001	0,986
20	Juli_2011	0,06	0,027	0,062	99,29	0,870	<0,0001	0,48	0,031	<0,0001	0,997
	Mai_2011	0,41	0,417	0,346	90,11	3,534	<0,0001	0,28	0,055	0,0002	0,966
25	Juli_2011	0,03	0,021	0,190	95,05	1,01	<0,0001	0,79	0,071	<0,0001	0,994
	Nov_2011	0,04	0,038	0,267	77,69	1,146	<0,0001	0,54	0,061	<0,0001	0,994
	Mrz_2012	0,009	0,013	0,526	92,40	2,039	<0,0001	0,77	0,120	0,001	0,994
	Mai_2012	0,002	0,001	0,050	90,54	0,463	<0,0001	0,97	0,037	<0,0001	0,999
	$\bar{x}_{25}$ (SD)	0,02	(0,02)		88,92	(7,71)		0,77	(0,18)		
15, 20, 25	$\bar{x}$ (SD)	0,09	(0,14)								

Tab. 17. Der **Vergleich der geschätzten Kapazitäten (K) und Wachstumsraten (r)** der sieben logistischen Anpassungen unter Verwendung des mittleren Anfangsbefalls ($\bar{x} = 0,09\%$) als fixierter Parameterwert (**). Als Basis dienten die **Befallshäufigkeiten** der Solo-Varianten von **Cercospora**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juli_2011	0,09**			87,79	2,815	<0,0001	0,31	0,007	<0,0001	0,986
20	Juli_2011	0,09**			99,61	0,825	<0,0001	0,45	0,004	<0,0001	0,997
	Mai_2011	0,09**			87,62	2,868	<0,0001	0,36	0,010	<0,0001	0,964
25	Juli_2011	0,09**			95,62	1,042	<0,0001	0,67	0,008	<0,0001	0,993
	Nov_2011	0,09**			78,69	1,094	<0,0001	0,48	0,008	<0,0001	0,993
	Mrz_2012	0,09**			94,01	2,593	<0,0001	0,58	0,014	<0,0001	0,988
	Mai_2012	0,09**			92,11	2,121	<0,0001	0,64	0,013	<0,0001	0,987

4.2.1.2 Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für Mehltau in den Solo-Varianten

Das früheste Erstaufreten wurde bei sieben von acht Versuchsdurchgängen nach 5 Tagen bonitiert (Abb. 17c). Das späteste Erstaufreten bei einem Versuchsdurchgang war nach 12 Tagen (25_Mai_2012_3, Abb. 17c). Die bonitierten Befallshäufigkeiten zum Erstaufreten variierten zwischen 9,76 % (Abb. 17c) und 54,55 % (Abb. 17b). Der geschätzte Anfangsbefall der logistischen Anpassung lag zwischen 0,02 und 16,52 % (Tab. 18). Der höchste Anfangsbefall wurde dabei für die Anpassung der Befallshäufigkeiten der hohen Temperaturstufen erreicht. Die Entwicklung der Befallshäufigkeit dauerte bei Rübenmehltau vom Erstaufreten bis zum Erreichen der Kapazität zwischen 4 (Abb. 17a) und 21 Tage (Abb. 17c).

Die Wachstumsrate der logistischen Regression nahm Werte zwischen 0,16 und 1,38/Tag an, was einer sehr hohen Streuung entspricht. Auch die Standardisierung mittels Verwendung des mittleren Anfangsbefalls (4,33 %) zeigte diese hohe Variabilität auf (Tab. 19).

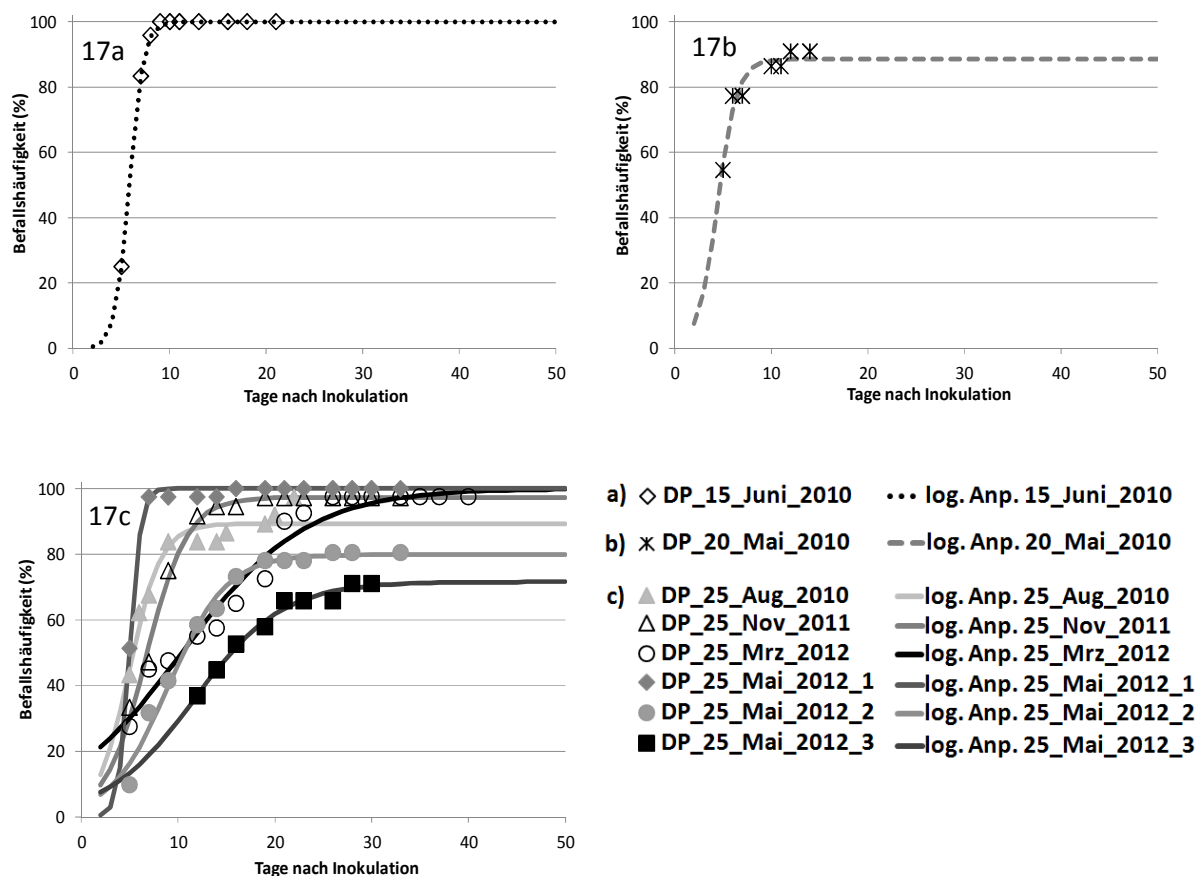


Abb. 17. **Der Verlauf der Befallshäufigkeit für Mehltau** in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) nach der Inokulation für drei verschiedene Temperaturstufen in der **Solo-Variante**. Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) für 15 °C (a), 20 °C (b) und 25 °C (c), sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt.

Tab. 18. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der acht **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** der **Solo-Varianten** von **Mehltau**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}_{25}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter bei 25°C, SD = Standardabweichung; $\bar{x}$ = Mittelwert über alle Temperaturstufen für y_0 ; (*) als Grenzwert für die maximal zu erreichende Kapazität festgelegt, da eine Befallshäufigkeit über 100 % nicht möglich war.

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juni_2010	0,03	0,01	0,076	100,00*	0,764	<0,0001	1,38	0,052	0,001	0,999
20	Mai_2010	1,14	1,723	0,545	88,45	2,065	<0,0001	0,98	0,289	0,028	0,967
25	Aug_2010	4,19	3,428	0,262	89,26	1,97	<0,0001	0,61	0,147	0,004	0,969
	Nov_2011	3,99	0,901	0,001	97,32	0,749	<0,0001	0,47	0,033	<0,0001	0,996
	Mrz_2012	16,52	3,082	0,0001	100,00*	2,824	<0,0001	0,16	0,020	<0,0001	0,982
	Mai_2012_1	0,02	0,020	0,485	100,00*	0,422	<0,0001	1,76	0,275	<0,0001	0,996
	Mai_2012_2	3,66	1,071	0,008	79,86	1,445	<0,0001	0,34	0,034	<0,0001	0,993
	Mai_2012_3	5,07	1,987	0,043	71,57	1,754	<0,0001	0,22	0,032	0,0004	0,991
	$\bar{x}_{25}$ (SD)	5,58	(5,64)		89,67	(11,80)		0,59	(0,59)		
15,20,25	$\bar{x}$ (SD)	4,33	(5,30)								

Tab. 19. Der **Vergleich der Kapazitäten (K) und Wachstumsraten (r)** der acht logistischen Anpassungen unter Verwendung des mittleren Anfangsbefalls ($\bar{x} = 4,33$ %) als fixierter Parameterwert (**). Als Basis dienten die **Befallshäufigkeiten** der **Solo-Varianten** von **Mehltau**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß; (*)als Grenzwert für die maximal zu erreichende Kapazität festgelegt, da eine Befallshäufigkeit über 100 % nicht möglich war.

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juni_2010	4,33**			100,00*	17,676	0,011	0,61	0,123	0,016	0,895
20	Mai_2010	4,33**			89,38	1,962	<0,0001	0,72	0,030	<0,0001	0,962
25	Aug_2010	4,33**			89,29	1,728	<0,0001	0,60	0,023	<0,0001	0,969
	Nov_2011	4,33**			97,40	0,687	<0,0001	0,46	0,008	<0,0001	0,996
	Mrz_2012	4,33**			100,00*	3,610	<0,0001	0,26	0,016	<0,0001	0,922
	Mai_2012_1	4,33**			100,00*	1,380	<0,0001	0,70	0,031	<0,0001	0,947
	Mai_2012_2	4,33**			80,24	1,313	<0,0001	0,32	0,001	<0,0001	0,992
	Mai_2012_3	4,33**			71,07	1,041	<0,0001	0,23	0,005	<0,0001	0,991

Für die Temperaturstufe 25 °C wurden Wachstumsraten zwischen 0,23 und 0,70/Tag erreicht. Ursachen lagen hierfür möglicherweise in der Inokulumdichte, was der Vergleich der drei Mai-Versuche, die hintereinander durchgeführt wurden (1 bis 3), andeutete. Die Inokulumdichte von Mehltau konnte aufgrund der trockenen Methode des Einstäubens nicht exakt bestimmt werden.

Die mittleren geschätzten Kapazitäten der verschiedenen Befallsverläufe lagen zwischen 71,57 und 100 %, wobei die 100 % als fester Parameter-Wert fixiert werden mussten, da eine Befallshäufigkeit oberhalb dieses Niveaus nicht möglich war (Tab. 18). Auch bei der Kapazität lag für Mehltau eine hohe Streuung der geschätzten Werte für die Temperaturstufe 25 °C vor. Der Vergleich der standardisierten Anpassungen (Tab. 19) schaffte für diese Problematik keine Abhilfe. Auch hier konnte die Inokulumdichte als mögliche Ursache aufgeführt werden.

Wie schon bei *Cercospora* wiesen die Kapazitäten, im Vergleich der drei Funktionsparameter, die höchste Signifikanz auf. Die geringste Signifikanz fand sich bei den Schätzungen des Anfangsbefalls.

Das Bestimmtheitsmaß der acht logistischen Anpassungen lag zwischen 0,967 und 0,999. Diese hohen Werte zeigten, dass das logistische Modell die erhobenen Daten für Rübenmehltau sehr gut erklärt.

4.2.1.3 Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für *Cercospora* in den Duo-Varianten

Das früheste Erstaufreten wurde nach 8 Tagen in der Variante C=M bonitiert. Das späteste Erstaufreten dieser Variante lag bei 12 Tagen. Bei der Kombination 1C2M waren die ersten Krankheitssymptome frühestens nach 9 Tagen und spätesten nach 12 Tagen zu beobachten (Mittelwert: 7,6 Tage). Für die Variante 1M2C lag die kürzeste Inkubationszeit für *Cercospora* bei 7 Tagen und die längste Inkubationsperiode dauerte 9 Tage, berechnet ab der ersten Inokulation von *Cercospora*. Die Zeitspanne vom Erstaufreten von *Cercospora* in der Duo-Variante bis zum Erreichen der Kapazität der Blattkrankheit dauerte in der Variante C=M zwischen 9 und 22 Tage (Mittelwert: 14,4 Tage), im Fall 1C2M zwischen 7 und 19 Tage (Mittelwert: 12,2 Tage) und für die Kombination 1M2C zwischen 5 und 12 Tage.

Für den Vergleich der einzelnen Versuche muss beachtet werden, dass die Variante C=M im November zwei Mal durchgeführt wurde (Nov_1 und Nov_2) und im März-Versuch (Mrz_2012) gar nicht untersucht wurde. Die anderen beiden Varianten 1C2M und 1M2C wurden dafür im November- und März-Versuch (Nov_1 und Mrz_2012) jeweils einmal geprüft.

Der Versuch Sept_2011_1 der Variante 1M2C konnte durch keine logistische Funktion valide angepasst werden, weil innerhalb eines Zeitintervalls von nur 5 Tagen (Erstaufreten bis zum Erreichen der Kapazität) ein extremer Anstieg der mittleren Befallshäufigkeit zu beobachten war.

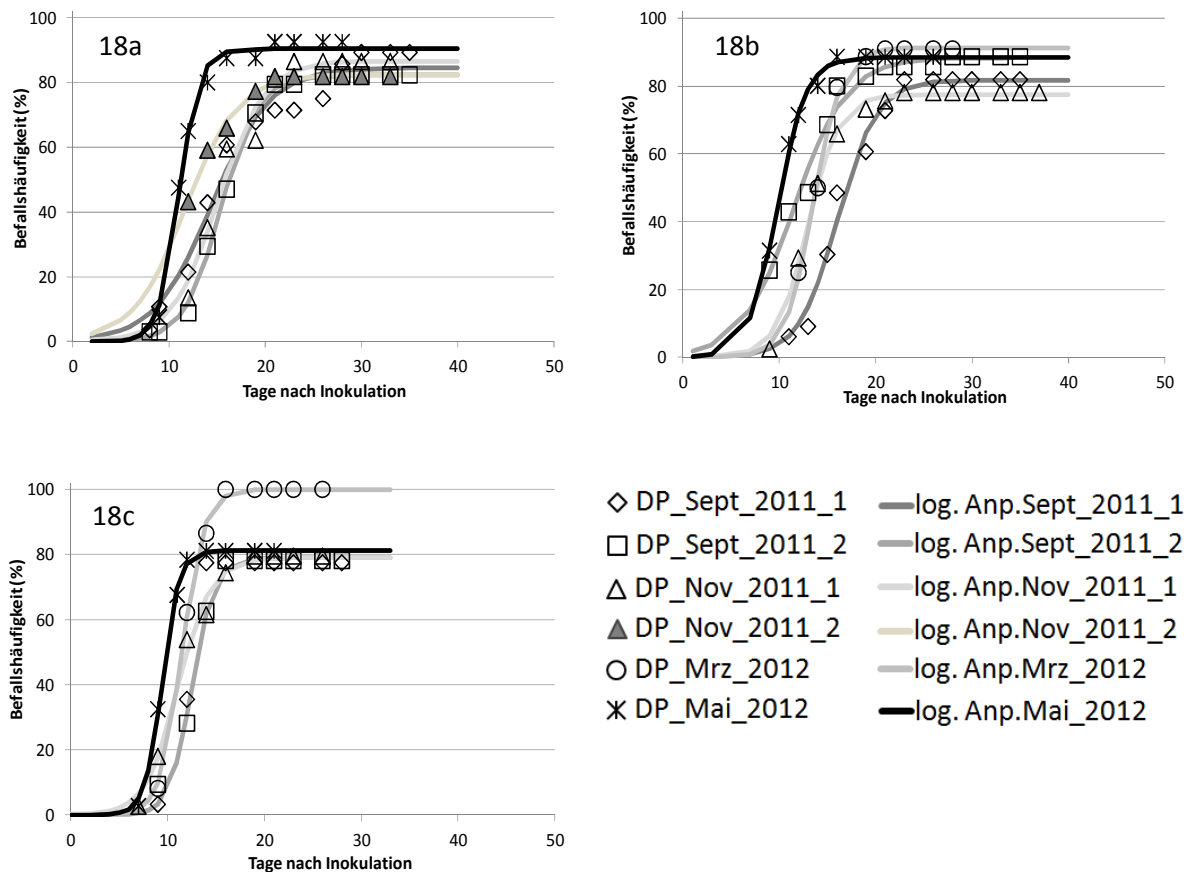


Abb. 18. **Der Verlauf der Befallshäufigkeit für *Cercospora*** in Abhängigkeit von der Zeit nach der Inokulation (Tage nach Inokulation von *Cercospora*) für die drei Interaktionsvarianten **C=M (a), 1C2M (b) und 1M2C (c)**. Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt. Den Versuch Nov_2011_2 gab es nur in der Variante C=M (a) und den Versuch Mrz_2012 nur für die Varianten 1C2M (b) und 1M2C (c).

Vergleicht man die Entwicklung der Befallshäufigkeiten für die anderen Versuche der drei Interaktionsvarianten (Abb. 18a-c), so zeigten sich kaum Unterschiede im Verlauf. Der geschätzte Anfangsbefall variierte zwischen 0,003 und 1,12 % (C=M, Tab. 20), 0,008 und 1,27 % (1C2M, Tab. 21) sowie zwischen $7,5 \times 10^{-7}$ und 0,002 % (1M2C, Tab. 22), demzufolge startete die Interaktionsvariante 1M2C mit geringeren Werten (Mittelwert: 0,0005 %) als die anderen beiden Kombinationen (Mittelwerte: 0,4 und 0,29 %).

Bei den Kapazitäten lagen die Werte für die Variante C=M zwischen 82,28 und 90,31 %, für 1C2M zwischen 77,47 und 91,23 % und für 1M2C zwischen 78,89 und 99,99 %. Die Gegenüberstellung der drei Mittelwerte, 85,25 % für C=M, 85,42 % für 1C2M und 84,8 % für 1M2C, wies auf ein einheitliches Endbefallsniveau hin.

Tab. 20. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** für **Cercospora** in der Interaktionsvariante **C=M**. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,67	0,508	0,219	84,59	2,8	<0,0001	0,33	0,054	0,0001	0,984
Sept_2011_2	0,03	0,01	0,027	82,28	0,626	<0,0001	0,52	0,026	<0,0001	0,999
Nov_2011_1	0,16	0,182	0,407	86,61	2,723	<0,0001	0,42	0,076	0,0009	0,982
Nov_2011_2	1,12	0,429	0,035	82,45	0,663	<0,0001	0,37	0,029	<0,0001	0,996
Mai_2012	0,003	0,003	0,476	90,31	1,39	<0,0001	0,95	0,119	<0,0001	0,994
$\bar{x}$ (SD)	0,4	(0,49)		85,25	(3,34)		0,52	(0,25)		

Tab. 21. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** für **Cercospora** in der Interaktionsvariante **1C2M**. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,03	0,03	0,328	81,68	1,736	<0,0001	0,49	0,062	<0,0001	0,992
Sept_2011_2	1,27	0,552	0,044	88,31	1,321	<0,0001	0,37	0,036	<0,0001	0,990
Nov_2011	0,03	0,014	0,087	77,47	0,591	<0,0001	0,62	0,04	<0,0001	0,998
Mrz_2012	0,008	0,005	0,173	91,23	0,874	<0,0001	0,69	0,046	<0,0001	0,998
Mai_2012	0,12	0,059	0,079	88,42	0,814	<0,0001	0,67	0,046	<0,0001	0,997
$\bar{x}$ (SD)	0,29	(0,55)		85,42	(5,66)		0,57	(0,14)		

Tab. 22. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** für **Cercospora** in der Interaktionsvariante **1M2C**. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	keine valide logistische Anpassung möglich									
Sept_2011_2	$2,7 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-6}$	0,701	78,89	1,558	<0,0001	0,88	0,125	0,0009	0,995
Nov_2011	0,002	0,002	0,429	79,1	1,619	<0,0001	0,59	0,065	0,0001	0,995
Mrz_2012	$8,6 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$	0,454	99,99	0,945	<0,0001	0,88	0,065	<0,0001	0,999
Mai_2012	$7,5 \times 10^{-7}$	$9,1 \times 10^{-7}$	0,447	81,21	0,788	<0,0001	1,13	0,074	<0,0001	0,999
$\bar{x}$ (SD)	0,0005	(0,001)		84,8	(10,18)		0,87	(0,22)		

Bei der Wachstumsrate lagen die erreichten Werte zwischen 0,33 und 0,95/Tag (C=M), 0,37 und 0,69/Tag (1C2M) und zwischen 0,59 und 1,13/Tag (1M2C). Auch bei diesem Funktionsparameter unterschieden sich die untersuchten Kombinationen nur gering voneinander. Einzig der Vergleich der Mittelwerte deutete auf eine schnellere Wachstumsrate bei Cercospora in der Variante 1M2C hin. Hier betrug der Mittelwert 0,87/Tag und war damit deutlich größer als die anderen beiden arithmetischen Mittel mit 0,52 und 0,57/Tag.

Die Gegenüberstellung des geschätzten Anfangsbefalls und der Wachstumsrate weist darauf hin, dass auf einen hohen Anfangsbefall eine geringe Rate folgte und umgekehrt ein niedriger Befall zu Beginn eine dem entsprechend hohe Rate erzeugte (vergleiche 1,12 % und 0,37/Tag mit $7,5 \times 10^{-7}$ % und 1,13/Tag). Ein Zusammenhang scheint hier gegeben.

Insgesamt besaß der Anfangsbefall, im Gegensatz zu den anderen beiden Funktionsparametern, die geringste Signifikanz. Die Kapazität hatte hingegen in allen betrachteten Fällen die höchste Signifikanz. Das Bestimmtheitsmaß war in allen Versuchen immer größer oder gleich 0,982, was eine sehr gute Erklärung der Daten durch das logistische Modell darstellte.

4.2.1.4 Die Entwicklung der Befallshäufigkeit für Mehltau in den Duo-Varianten

Das früheste Erstaufreten lag in der Variante C=M bei 6 Tagen und das späteste bei 12 Tagen. In der Variante 1C2M konnten die ersten Symptome von Mehltau frühestens 5 Tage und spätestens 7 Tage nach der Mehltau-Inokulation bonitiert werden. Für die dritte Kombination 1M2C war die kürzeste Inkubationszeit 5 Tage und die längste 6 Tage. Die Befallshäufigkeit zum Termin des Erstauftretens war bei der Variante C=M mit 3,57 % am niedrigsten. Der Versuch Nov_2011_1 hatte mit 10,81 % die höchste Befallshäufigkeit zu diesem Zeitpunkt. In der Variante 1C2M war nach Ablauf der Inkubationszeit die Befallshäufigkeit von 2,86 % der niedrigste Wert. Der höchste Wert wurde mit 29,55 % festgestellt. Für die Variante 1M2C waren zwei Termine für die Befallshäufigkeiten von Interesse. Zum einen der Befallswert zum Erstauftreten von Mehltau vor der Cercospora-Inokulation. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Versuch Mrz_2012 mit 0,07 % die wenigsten und der Versuch Sept_2011_1 mit 16,13 % die meisten befallenen Blätter. Am zweiten Termin (Befallshäufigkeit nach der Inokulation von Cercospora und der daraus resultierenden Abwaschung des Mehltaumyzels) hatte der Versuch Sept_2011_1 mit 3,22 % die niedrigste und Mai_2012 mit 89,19 % die höchste Befallshäufigkeit. In Abbildung 19c sind für die Variante 1M2C alle bonitierten Befallshäufigkeiten als Datenpunkte aufgeführt. Die logistische Anpassung beruhte aber nur auf den Daten, die nach der Cercospora-Inokulation erhoben wurden (vergleiche hierzu Abschnitt 3.3.1).

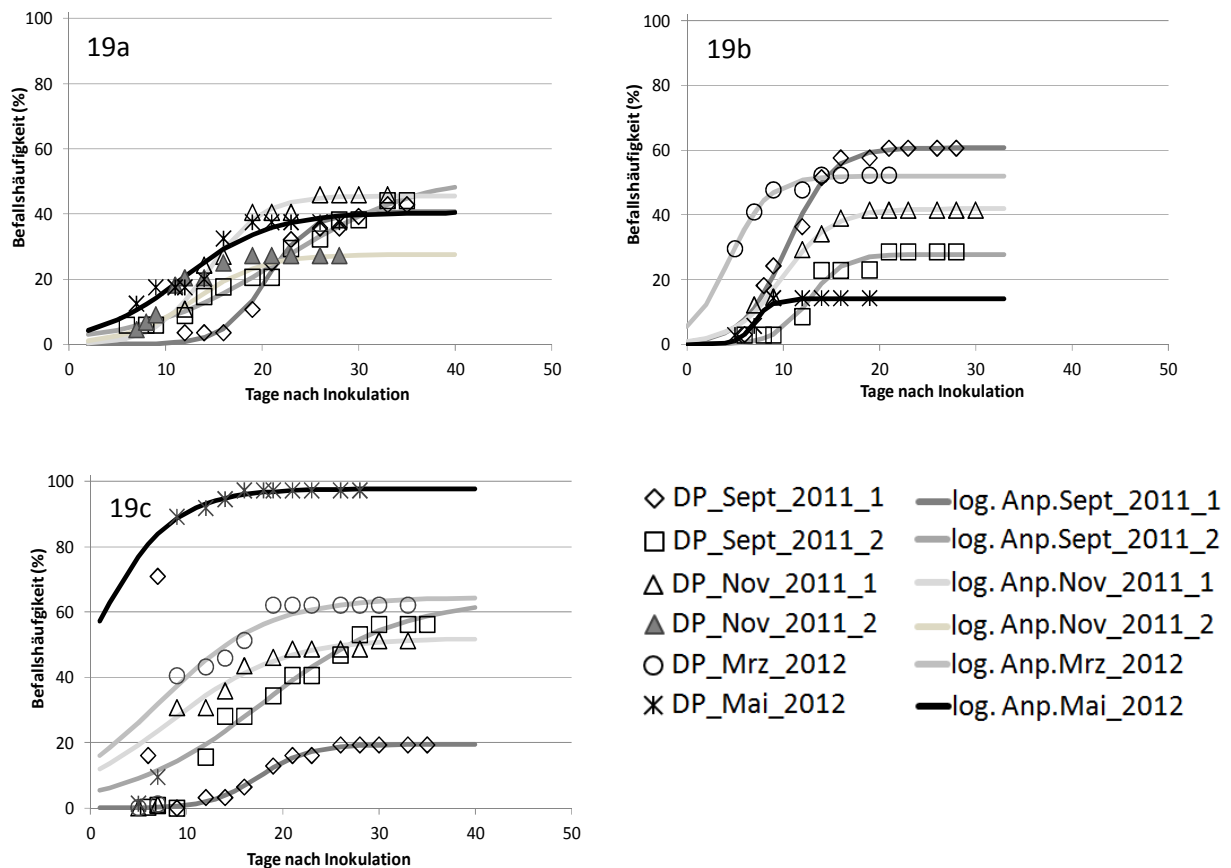


Abb. 19. **Der Verlauf der Befallshäufigkeit für Mehltau** in Abhängigkeit von der Zeit nach der Inokulation (Tage nach Inokulation von Mehltau) für die drei Interaktionsvarianten **C=M (a), 1C2M (b) und 1M2C (c)**. Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt. Den Versuch Nov_2011_2 gab es nur in der Variante C=M (a) und den Versuch Mrz_2012 nur für die Varianten 1C2M (b) und 1M2C (c).

Die Dauer der Epidemie vom Erstauftreten bis zum Erreichen der maximalen Befallshäufigkeit lag für die Variante C=M zwischen 12 und 27 Tagen (Mittelwert: 17,2 Tage), bei 1C2M konnte ein Abstand von 4 bis 15 Tagen festgestellt werden (Mittelwert: 11 Tage) und für die Kombination 1M2C wurde eine Zeitspanne von 14 bis 25 Tagen bestimmt (Mittelwert: 21 Tage). Die höchste Befallshäufigkeit lag bei Versuch Mai_2012 mit 89,19 % vor.

Der Vergleich der Kurvenverläufe für alle drei Interaktionsvarianten zeigte deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Interaktionsvarianten auf (Abb. 19a, b und c). Beginnend beim Anfangsbefall hatte die Variante 1M2C die höchsten Spannweiten zwischen den einzelnen Versuchen (Tab. 25). Der geringste Anfangsbefall wurde mit 0,02 % berechnet und der höchste Anfangsbefall lag bei 51,49 %. Diese gravierenden Abweichungen wurden dadurch verursacht, dass ausschließlich die Befallswerte nach der *Cercospora*-Inokulation logistisch angepasst wurden. Bei den anderen beiden Krankheitskombinationen war die Streuung deutlich niedriger. Für C=M lag der geringste Anfangsbefall

bei 0,004 % und der maximale bei 2,79 % (Tab. 23). In der dritten Variante 1C2M war der geringste Anfangsbefall bei $1,7 \times 10^{-6}$ % und der höchste Anfangsbefall bei 0,21 % (Tab. 24).

Die Gegenüberstellung der Kapazitäten zeigte folgendes Bild. In der Kombination C=M variierten die Werte zwischen 27,59 und 52,26 %. Bei der Duo-Variante 1C2M war die Spannweite größer als bei der zuvor genannten Kombination. Das geringste Befallsniveau mit 14,52 % wurde im Versuch Mai_2012 erreicht. Das höchste Befallsniveau mit 60,71 % wurde im Versuch Sept_2011_1 festgestellt. In der Variante 1M2C lag die niedrigste Kapazität von Mehltau bei 19,53 % Befallshäufigkeit und die höchste bei 97,84 %. Der Vergleich der Mittelwerte zeigte, dass Mehltau in der Variante 1M2C eine höhere Kapazität (59,56 %) erreichen konnte als in der Variante C=M (41,32 %) und in der Variante 1C2M (39,37 %).

Tab. 23. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** für **Mehltau** in der Interaktionsvariante **C=M**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,004	0,006	0,54	40,72	1,45	<0,0001	0,45	0,077	0,0004	0,990
Sept_2011_2	2,26	0,514	0,001	52,26	3,88	<0,0001	0,14	0,015	<0,0001	0,993
Nov_2011_1	0,23	0,196	0,284	45,57	1,246	<0,0001	0,37	0,06	0,0005	0,984
Nov_2011_2	0,65	0,344	0,093	27,59	0,904	<0,0001	0,29	0,042	<0,0001	0,985
Mai_2012	2,79	1,667	0,133	40,44	3,09	<0,0001	0,22	0,058	0,005	0,960
$\bar{x}$ (SD)	1,19	(1,26)		41,32	(9,05)		0,29	(0,12)		

Tab. 24. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** für **Mehltau** in der Interaktionsvariante **1C2M**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,03	0,026	0,254	60,71	1,33	<0,0001	0,43	0,048	<0,0001	0,993
Sept_2011_2	0,0004	0,001	0,714	27,78	1,195	<0,0001	0,57	0,134	0,003	0,981
Nov_2011	0,06	0,031	0,099	41,91	0,566	<0,0001	0,39	0,03	<0,0001	0,995
Mrz_2012	0,21	0,202	0,353	51,94	0,759	<0,0001	0,49	0,077	0,002	0,988
Mai_2012	$1,7 \times 10^{-6}$	$8,3 \times 10^{-6}$	0,852	14,52	0,6	<0,0001	1,13	0,357	0,034	0,980
$\bar{x}$ (SD)	0,06	(0,09)		39,37	(18,52)		0,60	(0,3)		

Tab. 25. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** für **Mehltau** in der Interaktionsvariante **1M2C**. Die logistische Anpassung erfolgte nur mit Datenpunkten nach der Cercospora-Inokulation. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,02	0,015	0,191	19,53	0,481	<0,0001	0,39	0,04	<0,0001	0,994
Sept_2011_2	4,8	2,022	0,049	63,98	6,53	<0,0001	0,14	0,031	0,0025	0,983
Nov_2011	10,47	3,703	0,022	52,03	1,867	<0,0001	0,17	0,039	0,002	0,967
Mrz_2012	14,13	5,7	0,038	64,44	2,25	<0,0001	0,18	0,047	0,005	0,956
Mai_2012	51,49	12,12	0,004	97,84	0,529	<0,0001	0,24	0,053	0,003	0,970
$\bar{x}$ (SD)	16,18	(20,46)		59,56	(28,14)		0,22	(0,1)		

Die Wachstumsraten unterlagen im Gegensatz zu den Kapazitäten einer deutlich geringeren Streuung. Für C=M hatten die Raten eine Spannweite von 0,14 bis 0,45/Tag. Die Kombination 1C2M hatte mit einer Rate von 0,39/Tag die langsamste Entwicklung und die schnellste Entwicklung wurde mit einer Rate von 1,13/Tag festgestellt. Im Fall 1M2C lag die höchste Rate bei 0,39/Tag und die niedrigste bei 0,14/Tag. Vergleicht man die Mittelwerte der Wachstumsraten der drei Duo-Varianten, so entwickelte sich Mehltau am schnellsten in der Variante 1C2M (0,6/Tag). Die Varianten C=M und 1M2C hatten im Mittel eine ähnlich Entwicklungsgeschwindigkeit (0,29 und 0,22/Tag).

Wie schon für Cercospora konnte auch für Mehltau ein Zusammenhang zwischen Anfangsbefall und Rate festgestellt werden. Die Bestimmtheitsmaße aller Versuche variierten zwischen 0,956 und 0,995, was für eine gute Modellanpassung spricht, dabei hatten die Schätzungen des Anfangsbefalls die geringste Signifikanz und die Kapazität die höchste.

4.2.2 Die Analyse der Befallsstärken

4.2.2.1 Die Entwicklung der Befallsstärke für Cercospora in den Solo-Varianten

Die geringste mittlere Befallsstärke nach Ablauf der Inkubationszeit betrug 0,002 % (Abb. 20c). Die höchste mittlere Befallsstärke zum Erstauftretenstermin war 0,32 %. Der geschätzte Anfangsbefall variierte von 0,0009 bis 0,15 % (Tab. 26). Die Wachstumsraten lagen bei 15, 20 und 25 °C zwischen 0,20 und 0,54/Tag und es konnte kein Zusammenhang zwischen Temperaturstufe und Rate festgestellt werden. Auch die Verwendung des standardisierten Anfangsbefalls (0,04 %) änderte nichts an dieser Beobachtung (Tab. 27).

Die Kapazitäten nahmen Werte von 12,93 bis 64,42 % an. Bei diesem geschätzten Funktionsparameter war für Cercospora ein eindeutiger Einfluss der Temperatur zu beobachten (Abb. 20d). Je höher dieser

Faktor war, desto höher war die erreichte maximale Befallsstärke. Dies konnte auch durch die Standardisierung der logistischen Funktion mittels Verwendung des mittleren Anfangsbefalls festgestellt werden (Tab. 27). In den beiden niedrigeren Temperaturstufen wurden nur Kapazitäten zwischen 14,95 und 21,72 % erreicht, bei 25 °C hingegen Werte von 51,96 bis 67,76 %.

Die Bewertung der Signifikanzen der drei Funktionsparameter unterschied sich nicht zur Anpassung der Befallshäufigkeit in der Solo-Variante von *Cercospora*. Das Bestimmtheitsmaß variierte zwischen 0,994 und 0,999. Wie bei den Befallshäufigkeiten für diese Blattkrankheit ließen sich die Befallsverläufe mit dem logistischen Modell sehr gut beschreiben.

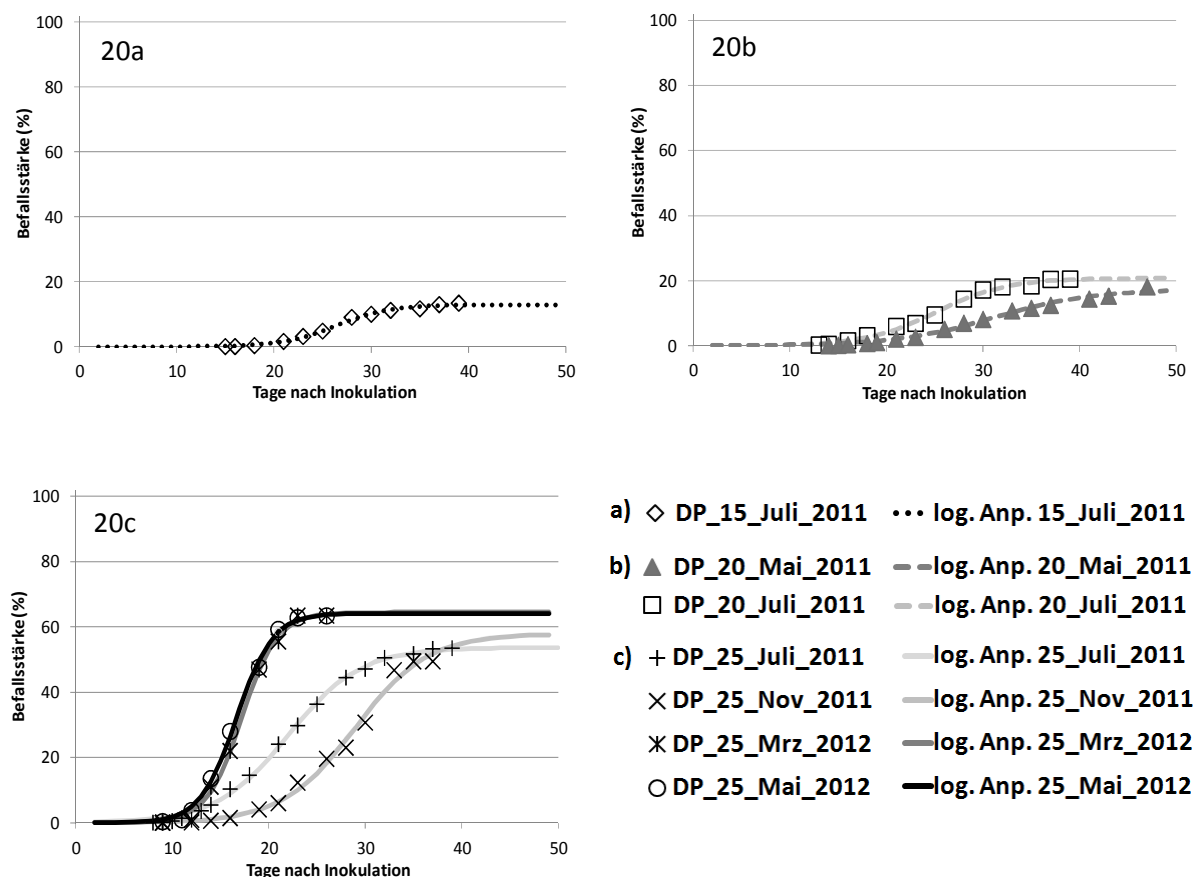


Abb. 20. **Der Verlauf der Befallsstärke für *Cercospora* in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) nach der Inokulation für drei verschiedene Temperaturstufen in der Solo-Variante.** Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) für 15 °C (a), 20 °C (b) und 25 °C (c), sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt.

Tab. 26. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der sieben **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** der **Solo-Varianten** von **Cercospora**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}_{25}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter bei 25°C, $\bar{x}$ = Mittelwert über alle Temperaturstufen für y_0 , SD = Standardabweichung

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juli_2011	0,0009	0,001	0,226	12,93	0,313	<0,0001	0,36	0,03	<0,0001	0,997
20	Juli_2011	0,02	0,01	0,066	20,75	0,531	<0,0001	0,27	0,02	<0,0001	0,997
	Mai_2011	0,04	0,02	0,072	17,36	0,774	<0,0001	0,20	0,018	<0,0001	0,994
25	Juli_2011	0,15	0,031	0,0003	53,66	0,633	<0,0001	0,27	0,01	<0,0001	0,999
	Nov_2011	0,03	0,021	0,218	57,86	3,808	<0,0001	0,26	0,029	<0,0001	0,996
	Mrz_2012	0,006	0,004	0,224	64,42	1,541	<0,0001	0,54	0,044	<0,0001	0,999
	Mai_2012	0,009	0,006	0,146	64,16	1,334	<0,0001	0,53	0,038	<0,0001	0,999
	$\bar{x}_{25}$ (SD)	0,05 (0,07)			60,03 (5,22)			0,4 (0,16)			
15, 20, 25	$\bar{x}$ (SD)	0,04 (0,05)									

Tab. 27. Der **Vergleich der Kapazitäten (K) und Wachstumsraten (r)** der sieben **logistischen Anpassungen** unter Verwendung des mittleren Anfangsbefalls ($\bar{x} = 0,04$ %) als fixierter Parameterwerte (**). Als Basis dienten die **Befallshäufigkeiten** der **Solo-Varianten** von **Cercospora**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juli_2011	0,04**			14,95	0,987	<0,0001	0,21	0,006	<0,0001	0,985
20	Juli_2011	0,04**			21,72	0,478	<0,0001	0,25	0,003	<0,0001	0,997
	Mai_2011	0,04**			17,42	0,565	<0,0001	0,19	0,003	<0,0001	0,994
25	Juli_2011	0,04**			51,96	0,831	<0,0001	0,33	0,004	<0,0001	0,997
	Nov_2011	0,04**			59,30	2,484	<0,0001	0,25	0,003	<0,0001	0,996
	Mrz_2012	0,04**			67,76	2,447	<0,0001	0,42	0,008	<0,0001	0,995
	Mai_2012	0,04**			66,60	1,808	<0,0001	0,44	0,006	<0,0001	0,997

4.2.2.2 Die Entwicklung der Befallsstärke für Mehltau in den Solo-Varianten

Die geringste mittlere Befallsstärke von Mehltau beim Erstaufretenstermin betrug 0,015 % (Abb. 21c) und der höchste Erstbefall lag bei 2,68 % (Abb. 21b). Der geschätzte Anfangsbefall variierte zwischen 0,00004 und 1,88 % (Tab 28). Die Wachstumsraten der Befallsstärke von Mehltau nahmen Werte zwischen 0,23 und 0,67/Tag an, was einer sehr hohen Streuung entsprach. Diese Variabilität der Rate blieb auch bei der Verwendung des mittleren Anfangsbefalls (0,46 %) erhalten (Tab 29). Es konnte deshalb kein Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und Rate festgestellt werden.

Die Kapazitäten lagen im Bereich zwischen 5,04 und 80,75 % und zeigten wie schon die Raten zuvor eine enorme Streuung, insbesondere innerhalb der Temperaturstufe von 25 °C (Tab 28). Ein Einfluss der Temperaturstufe auf die Kapazität konnte auch in diesem Fall durch Standardisierung nicht festgestellt werden (Tab 29). Die Streuung blieb zwischen und innerhalb der Temperaturstufen bestehen. Grund könnte, wie schon bei der Befallshäufigkeit beschrieben, eine unterschiedliche Inokulumdichte sein, deren genaue Bestimmung wegen der verwendeten Methode bei Mehltau nicht möglich war. Auch im Vergleich der graphischen Darstellung der Befallsverläufe für die Temperaturstufe von 25 °C ist diese Diskrepanz zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen feststellbar (Abb. 21c). Insgesamt konnten hier drei verschiedene Kurvenverläufe für Rübenmehltau beobachtet werden.

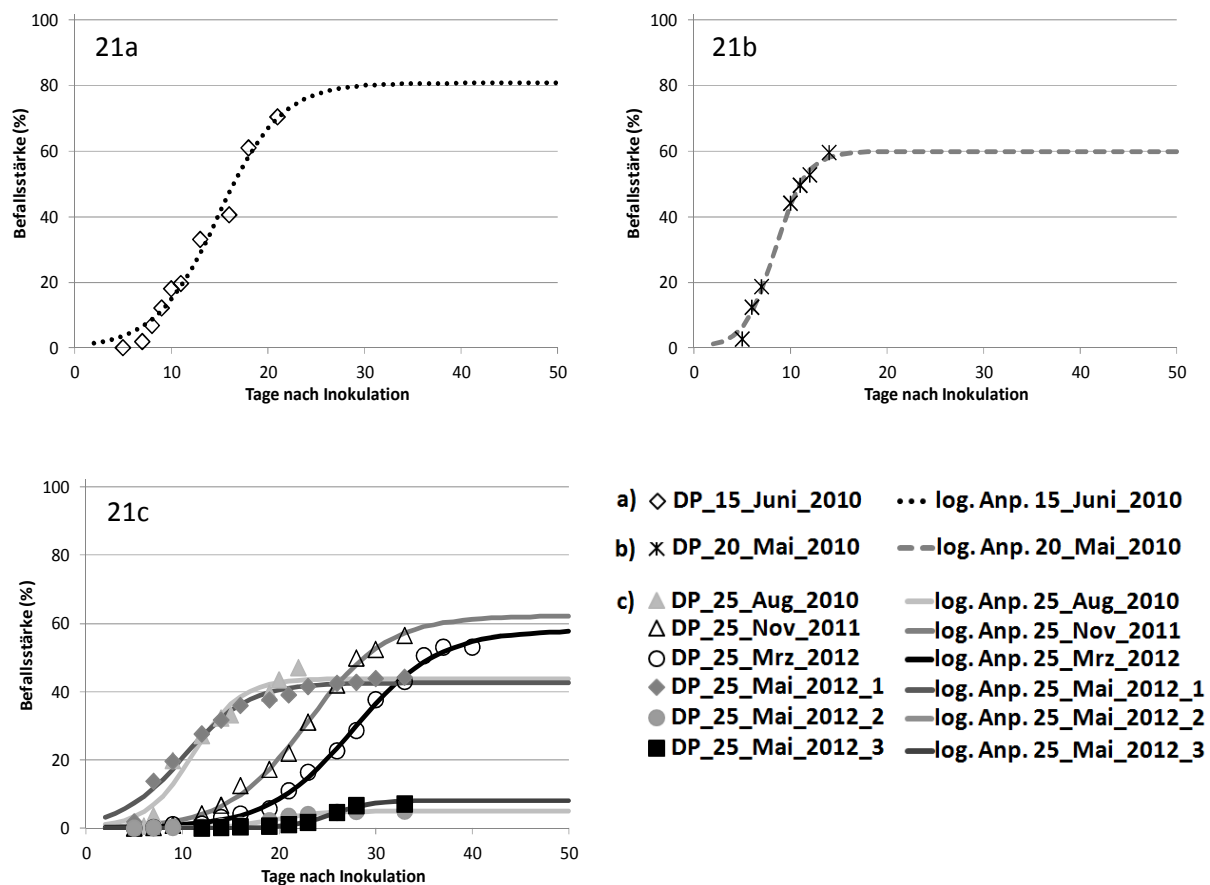


Abb. 21. **Der Verlauf der Befallsstärke für Mehltau** in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) nach der Inokulation für drei verschiedene Temperaturstufen in der **Solo-Variante**. Neben den Datenpunkten der Bonituren (Markierungsoptionen) für **15 °C (a)**, **20 °C (b)** und **25 °C (c)**, sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt.

Tab 28. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der acht **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** der **Solo-Variante** von **Mehltau**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß, $\bar{x}_{25}$ = arithmetisches Mittel für die Parameter bei 25°C, $\bar{x}$ = Mittelwert über alle Temperaturstufen für y_0 , SD = Standardabweichung

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juni_2010	0,81	0,48	0,135	80,75	10,2	<0,0001	0,31	0,052	0,0006	0,989
20	Mai_2010	0,32	0,17	0,137	68,24	2,677	<0,0001	0,67	0,076	0,0009	0,997
25	Aug_2010	0,35	0,295	0,279	43,61	2,329	<0,0001	0,45	0,084	0,001	0,985
	Nov_2011	0,24	0,074	0,008	62,18	2,195	<0,0001	0,24	0,015	<0,0001	0,998
	Mrz_2012	0,11	0,034	0,007	57,94	1,565	<0,0001	0,23	0,013	<0,0001	0,998
	Mai_2012_1	1,88	0,704	0,024	42,57	1,054	<0,0001	0,30	0,038	<0,0001	0,987
	Mai_2012_2	0,002	0,001	0,073	5,04	0,088	<0,0001	0,42	0,026	<0,0001	0,999
	Mai_2012_3	0,00004	0,00006	0,526	8,10	0,587	<0,0001	0,48	0,063	0,0003	0,996
	$\bar{x}_{25}$ (SD)	0,43	(0,72)		36,57	(24,51)		0,35	(0,11)		
15, 20, 25	$\bar{x}$ (SD)	0,46	(0,63)								

Tab 29. Der **Vergleich der Kapazitäten (K) und Wachstumsraten (r)** der acht **logistischen Anpassungen** unter Verwendung des mittleren Anfangsbefalls ($\bar{x} = 0,46$ %) als fixierter Parameterwert (**). Als Basis dienen die **Befallsstärken** der **Solo-Varianten** von **Mehltau**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß

Temperaturstufe	Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
15	Juni_2010	0,46**			74,60	5,186	<0,0001	0,36	0,012	<0,0001	0,987
20	Mai_2010	0,46**			61,54	2,269	<0,0001	0,57	0,015	<0,0001	0,996
25	Aug_2010	0,46**			43,85	2,480	<0,0001	0,41	0,022	<0,0001	0,979
	Nov_2011	0,46**			66,27	2,250	<0,0001	0,21	0,003	<0,0001	0,997
	Mrz_2012	0,46**			66,25	3,223	<0,0001	0,17	0,003	<0,0001	0,995
	Mai_2012_1	0,46**			41,15	1,112	<0,0001	0,45	0,019	<0,0001	0,976
	Mai_2012_2	0,46**			10,02	6,439	0,1506	0,10	0,018	0,0002	0,916
	Mai_2012_3	0,46**	keine valide Anpassung mit fixiertem Anfangsbefall möglich								

4.2.2.3 Die Entwicklung der Befallsstärke von *Cercospora* in den Duo-Varianten

Die geringste mittlere Befallsstärke beim Erstauftreten lag in der Variante C=M bei 0,003 % (Abb. 22a). Die höchste mittlere Befallsstärke zu diesem Termin wurde mit 0,13 % erreicht. In der Variante 1C2M war zu Beginn der Epidemie die niedrigste Befallsstärke mit 0,002 % (Abb. 22b) und die größte Befallsstärke mit 0,16 % festzustellen. In der dritten Variante (1M2C, Abb. 22c) starteten die Versuche mit der kleinsten mittleren Befallsstärke bei 0,003 und mit 0,02 % mit der höchsten mittleren Befallsstärke für diese Untersuchung.

Vergleicht man für die drei Interaktionsvarianten die berechneten Werte des Anfangsbefalls (Tab. 30, 31 und 32), so lag im Mittel die Variante C=M (0,1 %) vor der Variante 1C2M (0,01 %) und der Variante 1M2C (0,002 %).

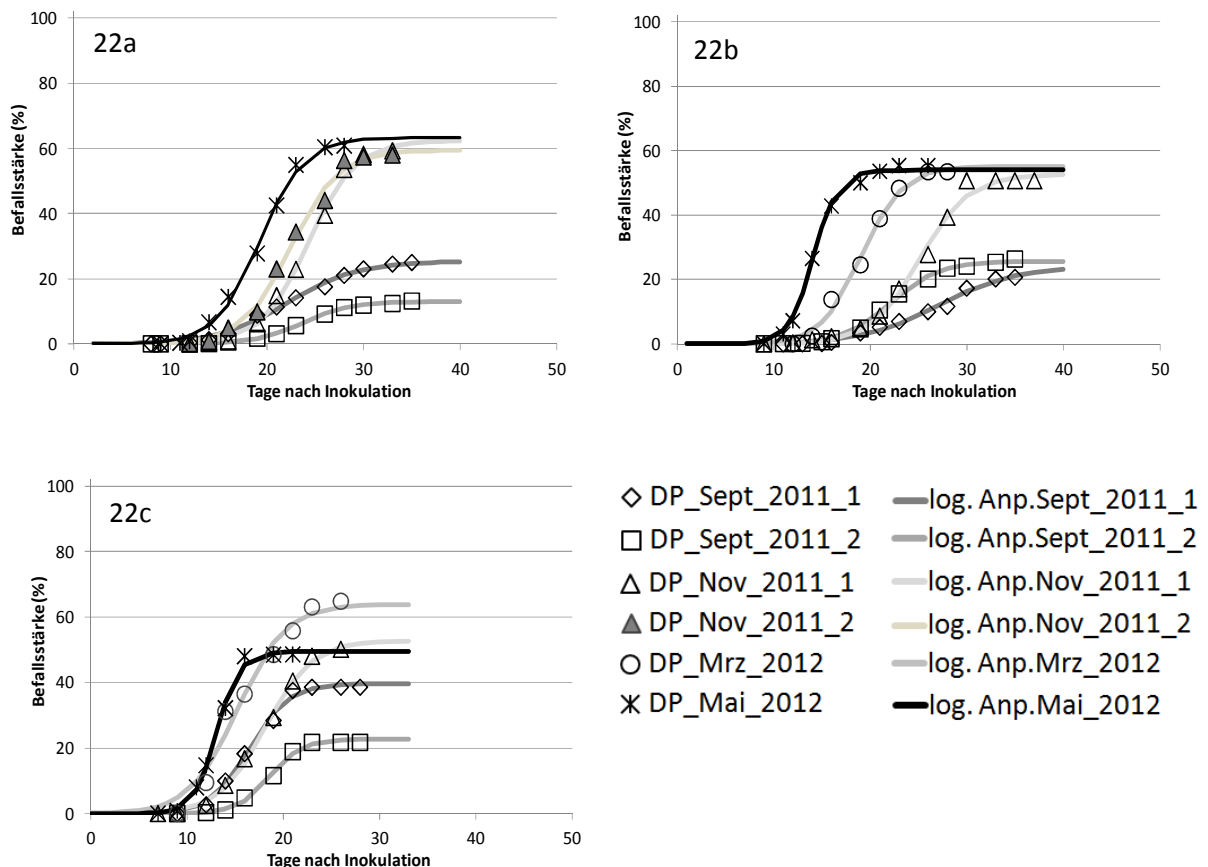


Abb. 22. Der Verlauf der Befallsstärke für *Cercospora* in Abhängigkeit von der Zeit nach der Inokulation (Tage nach Inokulation von *Cercospora*) für die drei Interaktionsvarianten **C=M (a)**, **1C2M (b)** und **1M2C (c)**. Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt. Den Versuch Nov_2011_2 gab es nur in der Variante C=M (a) und den Versuch Mrz_2012 nur für die Varianten 1C2M (b) und 1M2C (c).

Tab. 30. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** für **Cercospora** in der Interaktionsvariante **C=M**. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel der Parameter, R^2 = Bestimmtheitsmaß, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,50	0,025	0,079	25,4	0,816	<0,0001	0,28	0,025	<0,0001	0,997
Sept_2011_2	0,0009	0,0003	0,010	13,00	0,133	<0,0001	0,40	0,014	<0,0001	0,999
Nov_2011_1	0,003	0,002	0,223	62,39	1,871	<0,0001	0,41	0,033	<0,0001	0,998
Nov_2011_2	0,007	0,007	0,319	59,46	1,971	<0,0001	0,40	0,044	<0,0001	0,997
Mai_2012	0,01	0,008	0,150	63,27	1,62	<0,0001	0,44	0,033	<0,0001	0,998
$\bar{x}$ (SD)	0,1	(0,22)		44,7	(23,73)		0,39	(0,06)		

Tab. 31. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** für **Cercospora** in der Interaktionsvariante **1C2M**. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel der Parameter, R^2 = Bestimmtheitsmaß, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,03	0,021	0,229	24,14	2,070	<0,0001	0,25	0,032	<0,0001	0,994
Sept_2011_2	0,003	0,002	0,097	25,66	0,410	<0,0001	0,41	0,026	<0,0001	0,999
Nov_2011	0,002	0,002	0,294	52,67	1,376	<0,0001	0,40	0,037	<0,0001	0,997
Mrz_2012	0,007	0,007	0,385	55,18	2,031	<0,0001	0,47	0,056	0,0004	0,996
Mai_2012	0,0008	0,0007	0,347	53,98	0,896	<0,0001	0,79	0,070	<0,0001	0,998
$\bar{x}$ (SD)	0,01	(0,01)		42,33	(15,94)		0,46	(0,2)		

Tab. 32. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** für **Cercospora** in der Interaktionsvariante **1M2C**. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel der Parameter, R^2 = Bestimmtheitsmaß, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,0004	0,0006	0,497	39,71	1,434	<0,0001	0,49	0,06	0,0005	0,996
Sept_2011_2	$4,8 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-6}$	0,569	22,67	0,755	<0,0001	0,60	0,065	0,0002	0,998
Nov_2011	0,002	0,001	0,237	52,84	1,690	<0,0001	0,42	0,032	<0,0001	0,998
Mrz_2012	0,009	0,017	0,635	63,92	4,336	<0,0001	0,40	0,093	0,0080	0,986
Mai_2012	$2,4 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$	0,523	49,45	1,060	<0,0001	0,83	0,07	<0,0001	0,998
$\bar{x}$ (SD)	0,002	(0,004)		45,72	(15,52)		0,55	(0,18)		

Die Spannweite des Anfangsbefalls war dabei in allen drei Fällen sehr groß. Bei C=M variierte der Wert zwischen 0,0009 und 0,5 %. Für 1C2M wurden Werte zwischen 0,008 und 0,03 % berechnet und bei 1M2C lag der Bereich zwischen $2,4 \times 10^{-6}$ und 0,002 %.

Betrachtet man die verschiedenen Kapazitäten, so unterschieden sich die Mittelwerte mit den Werten 44,7 % (C=M), 42,33 % (1C2M) und 45,72 % (1M2C) kaum voneinander. Im Vergleich der einzelnen Kapazitäten einer Versuchsvariante war jedoch eine hohe Variabilität festzustellen. Differenzen von 50,27 % (C=M), 31,04 % (1C2M) und 40,95 % (1M2C) lagen jeweils zwischen der geringsten und der höchsten Kapazität der jeweiligen Variante.

Auch bei den Wachstumsraten konnte in der direkten Gegenüberstellung kein homogenes Bild erkannt werden. Bei der Variante C=M lagen vier der fünf Werte zwischen 0,4 und 0,44/Tag und einer deutlich darunter mit 0,28/Tag. Für die Kombination 1C2M hatte die niedrigste Rate den Wert 0,25/Tag und die höchste Rate den Wert 0,79/Tag. Beim Vergleich der Befallsverläufe von Variante 1M2C hatte der Versuch mit der schnellsten Befallszunahme eine Rate von 0,83/Tag. Die geringste Dynamik war durch eine Rate von 0,4/Tag gekennzeichnet.

Wie schon bei der Betrachtung der Befallshäufigkeiten fiel auf, dass ein Zusammenhang zwischen geschätztem Anfangsbefall und der Rate vorhanden war. Je niedriger der Befall zu Beginn, desto höher war die berechnete Rate und umgekehrt. Die Wahl des logistischen Modells wurde auch in diesem Fall durch hohe Bestimmtheitsmaße (0,986 bis 0,999) aller Versuche bestätigt.

4.2.2.4 Die Entwicklung der Befallsstärke von Mehltau in den Duo-Varianten

Bei der dritten Variante (1M2C) müssen zwei Befallsstärkewerte zu Beginn der Epidemie dargestellt werden. Aufgrund der feuchten Sekundärinokulation mit *Cercospora* und des daraus resultierenden Abwaschens des Mehлтаumyzels musste, neben dem Anfangsbefall zum Termin des Erstauftritts, zusätzlich der Befallswert nach der Inokulation dokumentiert werden. Vor der *Cercospora*-Inokulation lag die niedrigste Befallsstärke zum Erstauftreten von Mehltau bei 0,07 % im März-Versuch (Abb. 23c). Nach der Inokulation nahm der Versuch Sept_2011_1 mit 0,003 % diese Position ein. Den höchsten Wert der mittleren Befallsstärke zum Erstauftreten vor der zweiten Inokulation hatte der Versuch Sept_2011_2 mit 0,27 %. Nach der Inokulation lag der Versuch Mai_2012 mit 7,33 % an der Spitze. In der Abbildung für die Variante 1M2C sind alle Datenpunkte ab der ersten Inokulation aufgeführt. Die logistische Anpassung erfolgte ausschließlich über die Daten nach der *Cercospora*-Inokulation. Für den Versuches Mai_2012 war keine valide Approximation möglich, da innerhalb eines Zeitintervalls von nur 4 Tagen die maximale mittlere Befallsstärke von 0,23 % erreicht wurde (Zeitspanne vom Erstauftreten bis zum Erreichen der Kapazität).

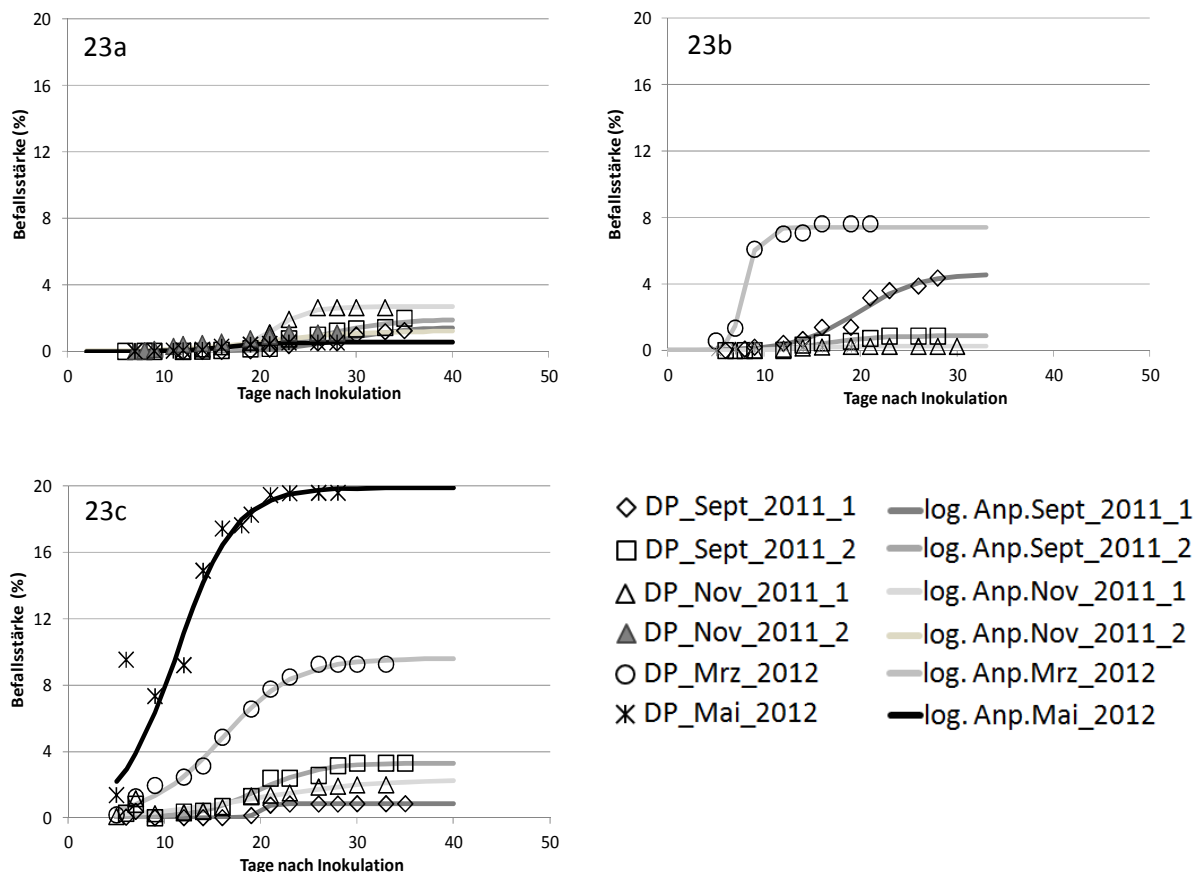


Abb. 23. **Der Verlauf der Befallsstärke für Mehltau** in Abhängigkeit von der Zeit nach der Inokulation (Tage nach Inokulation von Mehltau) für die drei Interaktionsvarianten **C=M (a), 1C2M (b) und 1M2C (c)**. Neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) sind zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt. Den Versuch Nov_2011_2 gab es nur in der Variante C=M (a) und den Versuch Mrz_2012 nur für die Varianten 1C2M (b) und 1M2C (c).

Beim Vergleich der berechneten Werte des Anfangsbefalls fielen zwischen den Kombinationsvarianten deutliche Unterschiede auf. Insbesondere in der Variante 1M2C lag eine große Spannweite des Befalls zu Beginn der Epidemie vor, bei der der minimale Wert $5,5 \times 10^{-16} \%$ und der maximale Wert $0,45 \%$ betrug (Tab. 35). Als Ursache konnte hierfür die Datenbasis genannt werden, welche bei 1M2C ausschließlich aus Bonitурpunkten bestand, die nach der Sekundärinokulation mit *Cercospora* erhoben wurden (s. Abschnitt 3.3.1). In den anderen beiden Duo-Varianten war der Anfangsbefall ebenfalls durch eine hohe Streuung gekennzeichnet. Für C=M variierten die Werte zwischen $1,8 \times 10^{-5}$ und $0,01 \%$ (Tab. 33). Bei 1C2M lag der Anfangsbefall zwischen $2,7 \times 10^{-9}$ und $0,001 \%$ (Tab. 34). Im Vergleich des gemittelten Anfangsbefalls der drei Varianten lag 1M2C mit dem höchsten Wert $0,14 \%$ vor der Variante C=M mit $0,002 \%$ und vor der Variante 1C2M mit $0,0003 \%$.

Bei Betrachtung der Kapazitäten fiel auf, dass Mehltau in den Kombinationsvarianten insgesamt ein viel niedrigeres Endbefallsniveau erreichte als *Cercospora* in den Interaktionsvarianten. Auch in den

Solo-Varianten besiedelte Mehltau deutlich mehr Blattfläche, als in den Duo-Varianten. Ein Vergleich wurde diesbezüglich in den Kapiteln 4.2.4.2 und 4.2.4.3 vorgenommen. Innerhalb der Variante C=M zeigte sich in der Gegenüberstellung der Kapazitäten ein sehr homogenes Bild. Die Spannweite lag zwischen 0,55 und 2,7 %. Bei den anderen beiden Kombinationen waren die Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchen deutlich höher. Im Fall 1C2M war der minimale Wert 0,25 % und der maximale Wert 7,41 %. Für die Variante 1M2C lag das Intervall der Kapazitäten zwischen 0,84 und 19,90 %. Vergleicht man die Mittelwerte der berechneten Kapazität, so erreichte Mehltau die höchste Befallsstärke in der Variante 1M2C (7,19 %). In der Variante 1C2M waren es 3,3 % und in der Variante C=M 1,58 %.

Die Wachstumsraten der Variante C=M variierten zwischen 0,22 und 0,56/Tag und wiesen somit eine geringe Streuung auf. In der Variante 1C2M war die Streuung deutlich höher. Die langsamste Entwicklung zeigte der Versuch Sept_2011_1 mit einer Rate von 0,32/Tag. Die schnellste Entwicklung hatte dagegen eine Rate von 1,45/Tag. Bei der Variante 1M2C waren die kleinste Rate 0,17/Tag und die größte Rate 1,76/Tag. Auch hier lag eine große Streuung zwischen den einzelnen Versuchen vor. Vergleicht man die Mittelwerte der drei Interaktionsvarianten, so wuchs Mehltau im Mittel am schnellsten in der Variante 1C2M (Rate: 0,69/Tag). An zweiter Position lag die Variante 1M2C mit einem Mittelwert von 0,57/Tag. Die geringste Wachstumsrate hatte die Variante C=M mit 0,36/Tag. Auch in diesem Fall war eine Beziehung zwischen Anfangsbefall und Rate vorhanden (vergleiche Versuch 2011_1 mit Nov_2011 in der Variante 1M2C).

Tab. 33. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** für **Mehltau** in der Interaktionsvariante **C=M**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel der Parameter, R^2 = Bestimmtheitsmaß, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,0004	0,0006	0,523	1,48	0,203	<0,0001	0,29	0,059	0,0012	0,988
Sept_2011_2	0,001	0,001	0,484	1,93	0,208	<0,0001	0,28	0,058	0,0005	0,984
Nov_2011_1	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$	0,460	2,70	0,061	<0,0001	0,56	0,061	<0,0001	0,997
Nov_2011_2	0,01	0,007	0,096	1,24	0,086	<0,0001	0,22	0,031	<0,0001	0,991
Mai_2012	0,0004	0,0003	0,200	0,55	0,017	<0,0001	0,43	0,046	<0,0001	0,996
$\bar{x}$ (SD)	0,002	(0,004)		1,58	(0,8)		0,36	(0,14)		

Tab. 34. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** für **Mehltau** in der Interaktionsvariante **1C2M**. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel der Parameter, R^2 = Bestimmtheitsmaß, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	0,001	0,002	0,536	4,64	0,45	<0,0001	0,32	0,063	0,001	0,986
Sept_2011_2	$7,6 \times 10^{-5}$	0,0001	0,603	0,88	0,054	<0,0001	0,40	0,082	0,001	0,986
Nov_2011	$1,4 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-7}$	0,092	0,25	0,002	<0,0001	0,60	0,026	<0,0001	0,999
Mrz_2012	$2,7 \times 10^{-9}$	$8,9 \times 10^{-9}$	0,776	7,41	0,171	<0,0001	1,45	0,223	0,001	0,995
Mai_2012	keine valide logistische Anpassung möglich									
$\bar{x}$ (SD)	0,0003	(0,0005)		3,3	(3,36)		0,69	(0,52)		

Tab. 35. Die Auflistung der **geschätzten Parameterwerte** der fünf **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärke** für **Mehltau** in der Interaktionsvariante **1M2C**. Die logistische Anpassung erfolgte nur mit Datenpunkten nach der Cercospora-Inokulation. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel der Parameter, R^2 = Bestimmtheitsmaß, SD = Standardabweichung

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Sept_2011_1	$5,5 \times 10^{-16}$	$3,3 \times 10^{-15}$	0,87	0,84	0,005	<0,0001	1,76	0,316	0,0005	0,999
Sept_2011_2	0,005	0,006	0,398	3,29	0,18	<0,0001	0,33	0,059	0,0009	0,986
Nov_2011	0,09	0,086	0,333	2,32	0,54	0,002	0,17	0,066	0,032	0,912
Mrz_2012	0,14	0,047	0,02	9,61	0,227	<0,0001	0,27	0,023	<0,0001	0,995
Mai_2012	0,45	0,275	0,143	19,90	0,588	<0,0001	0,33	0,052	0,0004	0,982
$\bar{x}$ (SD)	0,14	(0,19)		7,19	(7,85)		0,57	(0,67)		

4.2.3 Die Analyse der Inkubationszeiten

4.2.3.1 Die festgestellte Inkubationszeit für *Cercospora* im Vergleich zu Literaturdaten

Die in der Literatur bei BLEIHOLDER & WELTZIEN (1972a; b) beschriebenen Ergebnisse bei sechs untersuchten Temperaturstufen zeigen, dass mit ansteigender Temperatur bis 32 °C eine Verkürzung der Inkubationszeit für *Cercospora* erreicht wurde (Abb. 24). Die Untersuchungen wurden an sechs bis sieben Wochen alten Zuckerrübenpflanzen durchgeführt. Die Inkubationszeit wurde dabei als Zeitpunkt definiert, an dem 50 % der Pflanzen erste Symptome zeigten. Der Vergleich der eigenen Laborergebnisse nach dieser Definition zeigte eine weitestgehende Übereinstimmung der festgestellten Inkubationszeiten (Abb. 24a). Bei den Versuchen 20_Mai_2011 sowie 25_Mrz_2012 und 25_Nov_2011 wurde der Termin „50 % der Pflanzen zeigen erste Symptome“ mit etwas Verzögerung erreicht. Der Zusammenhang zwischen steigender Temperatur und verkürzter Inkubationszeit konnte auch in den Laborversuchen nachgewiesen werden.

Zusätzlich wurde ein Vergleich der Literaturdaten mit den Laborversuchsdaten nach der Definition „erste sichtbare Symptome“ durchgeführt (Abb. 24b). Hier zeigte sich eine noch bessere Übereinstimmung der beiden Erhebungen insbesondere für 20 und 25 °C. Das Ergebnis für 15 °C hatte in den Laborversuchen ein deutlich früheres Erstauftreten, als es in der Literatur beschrieben wurde.

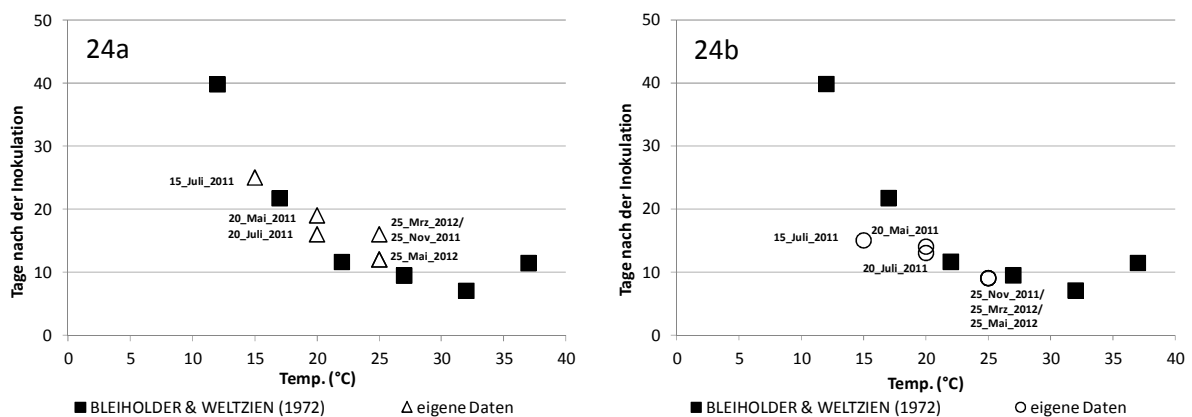


Abb. 24. Der Vergleich von Literaturdaten von BLEIHOLDER & WELTZIEN (1972 a; b) zur Inkubationszeit von *Cercospora* und den eigenen Versuchsergebnissen für die drei Temperaturstufen 15 , 20 und 25 °C. (a) zeigt den Vergleich der eigenen Daten (Dreiecke) mit den Daten von BLEIHOLDER & WELTZIEN (Quadrate) nach der Definition des Erstauftretens von BLEIHOLDER & WELTZIEN „50 % der Pflanzen zeigen erste Symptome“. (b) zeigt die eigenen Daten (Kreise) nach der Definition des Erstauftretens „erste sichtbare Symptome“ im Vergleich mit den Daten von BLEIHOLDER & WELTZIEN (Quadrate) mit der Definition „50 % der Pflanzen zeigen erste Symptome“.

4.2.3.2 Die festgestellte Inkubationszeit für Mehltau im Vergleich zu Literaturdaten

Für den Vergleich der Inkubationszeit von Rübemehltau wurde die Veröffentlichung von DRANDAREVSKI (1969b) gewählt. Er führte seine Versuche an 20 Zuckerrüben im 4-Blattstadium mit insgesamt 70 bis 80 Blättern durch. Das Erstaufreten der Blattkrankheit wurde auf „10 % Befallsstärke“ definiert. Beurteilte man die Ergebnisse der eigenen Laborversuche nach dieser Definition, so zeigte sich für 15 und 20 °C eine eindeutige Übereinstimmung mit den Literaturdaten (Abb. 25a). Die Ergebnisse für 25 °C deckten sich nur in zwei von sechs Versuchsdurchgängen mit den Ergebnissen von DRANDAREVSKI. Die Versuchsdurchgänge 25_Nov_2011 und 25_Mrz_2012 erreichten zu einem späteren Zeitpunkt die festgelegte Marke von 10 % Befallsstärke (16 und 21 Tage). Die Versuchsdurchgänge 25_Mai_2012_2 und 25_Mai_2012_3 blieben während des gesamten Beobachtungszeitraumes unterhalb des Grenzwertes mit einer Kapazität von 5,01 und 7,12 % mittlerer Befallsstärke. Aus diesem Grund sind sie in Abbildung 25a nicht dargestellt.

Der zusätzliche Vergleich der Laborergebnisse mit der Definition „Erstaufreten gleich erste sichtbare Symptome“ und den Literaturdaten (Abb. 25b) zeigte insbesondere für 25 °C eine höhere Übereinstimmung. Wie zu erwarten trat Mehltau nach diesem Begriffsverständnis insgesamt etwas früher auf als nach der „10 % Befallsstärke“ Definition.

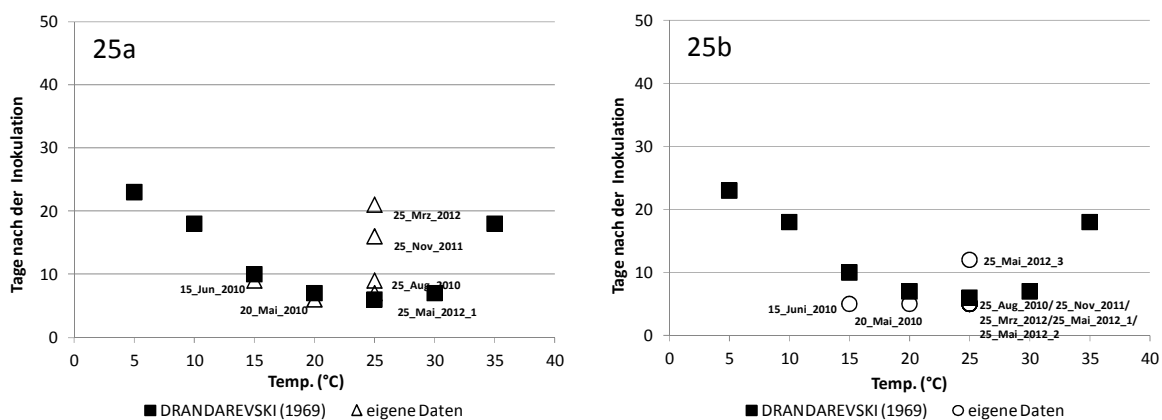


Abb. 25. Der **Vergleich von Literaturdaten** von DRANDAREVSKI (1969) zur **Inkubationszeit von Mehltau** und **den eigenen Versuchsergebnissen** für die drei Temperaturstufen 15 , 20 und 25 °C. (a) zeigt den Vergleich der eigenen Daten (Dreiecke) mit den Daten von DRANDAREVSKI (Quadrate) nach der Definition des Erstauftretens von DRANDAREVSKI „10 % Befallsstärke vorhanden“. (b) zeigt die eigenen Daten (Kreise) nach der Definition des Erstauftretens „erste sichtbare Symptome“ im Vergleich mit den Daten von DRANDAREVSKI (Quadrate) mit der Definition „10 % Befallsstärke“ vorhanden“.

4.2.4 Der Vergleich Cercospora- und Mehltau epidemien

4.2.4.1 Die Solo-Varianten beider Krankheiten

Im Vergleich der beiden Blattkrankheiten unter konstant kontrollierten Bedingungen fiel auf, dass Cercospora sich deutlich langsamer ausbreitet als Rübemehltau. Durch eine kürzere Inkubationszeit, die je nach Temperaturstufe die Hälfte bis ein Drittel der Inkubationszeit von Cercospora ausmachte, benötigte Rübemehltau einen deutlich kürzeren Zeitraum bis zum Erreichen der Kapazität. Des Weiteren zeigte sich, dass die Werte für die Befallshäufigkeit (vergleiche 9,76 bis 54,55 % für Solo M mit 2,38 bis 18,18 % für Solo C) wie auch für die Befallsstärke (vergleiche 0,015 bis 2,68 % für Solo M mit 0,002 bis 0,32 % für Solo C) zum Termin des Erstauftretens deutlich höher waren als die Werte, die von Cercospora zu diesem ersten Meßzeitpunkt erreicht wurden. Dies spiegelte sich auch im geschätzten Anfangsbefall der logistischen Anpassung der Befallshäufigkeit wider. Für Mehltau wurden deutlich höhere Werte berechnet, als dies für die Anpassungen der Befallsverläufe für Cercospora der Fall war.

Die Kapazitäten der Befallshäufigkeiten zeigten für Cercospora und Mehltau keinen Einfluss des Temperaturparameters. Der Wertebereich variierte unter Verwendung eines standardisierten Anfangsbefalls zwischen 78,69 und 99,61 % für Cercospora sowie 71,07 und 100 % für Mehltau. Bei der Analyse der Kapazitäten für die Befallsstärke konnte aus den Beobachtungen für Cercospora ein Anstieg der maximalen Befallsstärke mit Zunahme der Temperatur festgestellt werden. Für eine sichere Bestätigung dieser These fehlten allerdings Versuchswiederholungen der niedrigen und mittleren Temperaturstufen. Für Mehltau kann dieser Zusammenhang zwischen ansteigender Temperatur und gesteigerter Kapazität nicht gemacht werden, da nicht nur zwischen den drei Temperaturstufen, sondern auch innerhalb der mit vielen Wiederholungen vertretenen Stufe bei 25 °C eine sehr hohe Streuung der Daten und der daraus resultierenden logistischen Anpassungen vorhanden war. Diese könnten durch eine variable Inokulummenge bedingt sein (s. Erörterung Abschnitt 4.2.1.2 und 4.2.2.2), die aufgrund der Eigenschaften von Mehltau nicht besser eingestellt werden konnte.

Bei der Wachstumsrate der Befallshäufigkeit deutete sich für Cercospora erneut eine Beziehung mit der Temperatur an. Aus den vorliegenden Ergebnissen konnten aber nur Tendenzen abgelesen werden, da eine ausreichende Anzahl an Versuchswiederholungen für 15 und 20 °C fehlten. Bei der Wachstumsrate der Befallsstärken für beide Krankheiten zeigte sich bei den vorliegenden Ergebnissen kein Temperatureinfluss. Die Raten lagen in einem Wertebereich von 0,20 bis 0,54/Tag für Solo C und 0,23 bis 0,67/Tag für Solo M.

4.2.4.2 Die Interaktionsvarianten beider Krankheiten

Wie schon in den Solo-Varianten der beiden Krankheiten festgestellt, hatte Mehltau eine deutlich kürzere Inkubationszeit als Cercospora. Dies führte dazu, dass Mehltau in der Interaktionsvariante C=M trotz gleichem Inokulationstermin in den Versuchen Sept_2011_2, Nov_2011_2 und Mai_2012 einige Tage vor Cercospora auftrat. Im Versuch Nov_2011_1 traten beide Krankheiten gleichzeitig auf, im Versuch Sept_2011_1 erfolgte das Erstaufreten von Mehltau vier Tage nach dem Erstaufreten von Cercospora, weil der Einfluss von Blattnässe und geringerer Inokulummenge das Sichtbarwerden der ersten Symptome in diesem Versuch möglicherweise verzögerte. In den Varianten 1C2M und 1M2C waren jeweils die zuerst inokulierten Krankheiten auch als erste Krankheit auf den Zuckerrübenblättern vorzufinden.

Die Zeitspanne vom Erstaufreten bis zum Erreichen der Kapazitäten war für Cercospora in der Variante C=M im Mittel über alle fünf Versuche kürzer (14,4 Tage) als für Mehltau (17,2 Tage). Bei 1C2M lagen beide Krankheiten auf einem Niveau mit 11 Tagen für Mehltau und 12,2 Tagen für Cercospora. Bei der Variante 1M2C war Cercospora deutlich schneller im Erreichen der Kapazität. Im Mittel benötigte Cercospora 7,6 Tage, Mehltau aber 21 Tage.

In der graphischen Darstellung der logistischen Funktionen der Befallshäufigkeit für Cercospora (Abb. 18) zeigte sich über alle drei Varianten ein homogenes Bild im Gegensatz zu Mehltau (Abb. 19). Stellte man die berechneten Werte des Anfangsbefalls der Befallshäufigkeiten für die beiden Blattkrankheiten gegenüber, so zeigte sich in den insgesamt 14 vergleichbaren Versuchen (Tab. 20 bis Tab. 25), dass Cercospora in vier Fällen (28,57 %) mit einem höheren Anfangsbefall begann. Die restlichen zehn Fälle (71,43 %) wiesen eine höhere Anfangsbefallsstärke für Mehltau auf. Vergleicht man das Mittel des Anfangsbefalls, so konnten keine Unterschiede zwischen Cercospora und Mehltau festgestellt werden (Tab. 36).

Bei den Kapazitäten dominierte hingegen eindeutig Cercospora. In 13 von 14 Fällen (92,86 %) war die Ausbreitung von Cercospora über alle Kombinationsvarianten hinweg deutlich höher als von Mehltau. Dies zeigte auch das Ergebnis der Varianz-Analyse (Tab. 36). Cercospora erreichte ein mittleres Niveau von 85,15 %, Mehltau besiedelte deutlich weniger Versuchspflanzen mit insgesamt 46,75 %.

Die Geschwindigkeit von Cercospora war signifikant höher als von Mehltau (Vergleich 0,64 zu 0,37/Tag).

Tab. 36. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die Funktionsparameter der **logistischen Anpassung** der **Befallshäufigkeit** und der **Befallsstärke** für **Cercospora** und **Mehltau** in der **Duo-Variante**. Der Vergleich der Krankheiten erfolgt senkrecht in der Spalte. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag)

(*) Für Versuch Sept_2011_1 der Variante 1M2C konnte keine logistische Anpassung der Befallshäufigkeit von Cercospora durchgeführt werden. Deshalb liegt hier der Fall $n = 14$ vor.

(**) Für den Versuch Mai_2012 der Variante 1C2M konnte keine valide logistische Anpassung der Befallsstärke von Mehltau durchgeführt werden. Deshalb liegt hier der Fall $n = 14$ vor.

logistische Anpassung der Befallshäufigkeit				logistische Anpassung der Befallsstärke			
Krankheit	y_0 (%)	K (%)	r (1/Tag)	Krankheit	y_0 (%)	K (%)	r (1/Tag)
Cercospora ($n = 14$)*	0,25a	85,18a	0,64a	Cercospora ($n = 15$)	0,04a	44,25a	0,47a
Mehltau ($n = 15$)	5,81a	46,75b	0,37b	Mehltau ($n = 14$)**	0,05a	4,08b	0,53a

In der Betrachtung der Befallsstärken mussten die Ergebnisse detaillierter verglichen werden. Beim Anfangsbefall wurden die drei Kombinationsvarianten separat betrachtet. In der Variante C=M waren drei der fünf Werte (60 %) bei Cercospora kleiner als bei Mehltau und bei zwei Werten (40 %) war der Sachverhalte umgekehrt. Bei 1C2M begannen alle vier vergleichbaren Versuche mit einem höheren Anfangsbefall für Cercospora. In der Variante 1M2C war es genau umgekehrt, hier startet Mehltau in vier von fünf Fällen (80 %) mit höheren Befallsstärken. Insgesamt begann die Cercospora-Epidemie in acht von 14 Fällen (57,14 %) mit einem höheren Anfangsbefall. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Cercospora (0,04 %) und Mehltau (0,05 %) in Bezug auf den Anfangsbefall festgestellt werden (Tab. 36).

Die Kapazität als Funktionsparameter zeigte im Vergleich eine eindeutige Dominanz der Cercospora (Tab. 36). Es wurden über alle Varianten hinweg mehr Blätter mit Cercospora befallen als mit Mehltau. Cercospora dominierte in der Befallssituation der Interaktion, was durch das Ergebnis der Varianz-Analyse bestätigt wurde (vergleiche 44,25 zu 4,08 %).

In der Gegenüberstellung der Wachstumsraten ergab sich, wie schon beim Anfangsbefall, kein eindeutiges Verhältnis zwischen den Krankheiten. Bei C=M hatten zwei von fünf Fällen (40 %) gleich hohe Raten, in weiteren zwei Fällen (40 %) wuchs Cercospora schneller im Bestand als Mehltau und in einem Fall (20 %) breitete sich Mehltau schneller aus. In der Variante 1C2M hatte Mehltau in drei von vier (75 %) Fällen die höhere Rate und in einem Fall (25 %) war die Rate auf gleichem Niveau. Bei 1M2C breitete sich Cercospora hingegen mit höherer Geschwindigkeit aus als Mehltau (in vier von fünf Fällen (80 %)). In insgesamt sechs von 14 Fällen (42,86 %) wuchs Cercospora schneller, in fünf Fällen (35,71 %) lag die umgekehrte Situation vor und bei drei Fällen (21,43 %) war die Geschwindigkeit gleich hoch. Der Mittelwertvergleich von 0,47/Tag (Cercospora) und 0,53/Tag (Mehltau) zeigte keine Unterschiede in der Epidemiegeschwindigkeit.

4.2.4.3 Die Gegenüberstellung Solo- und Interaktionsvarianten

Zwischen der Solo-Variante und den Interaktionsvarianten für 25 °C zeigte sich für die logistischen Anpassungen der Befallshäufigkeit von *Cercospora* kein signifikanter Unterschied im Vergleich der drei Funktionsparameter (Anfangsbefall (y_0), Kapazität (K) und Wachstumsrate (r)) (Tab. 37). Beim Anfangsbefall begann im Mittel die Variante C=M mit dem höchsten Wert (0,40 %) und die Variante 1M2C mit dem niedrigsten Befallswert (0,001 %). Bei der Kapazität erreichte Solo C das höchste Niveau mit 88,92 %, 1M2C hatte mit 84,80 % das geringste Niveau. Die Rate/Tag zeigte an, dass *Cercospora* in der Variante 1M2C am schnellsten zunahm (0,87/Tag), in der Variante C=M (0,52/Tag) am langsamsten.

Für Mehltau zeigte sich eine andere Situation, hier konnte nur für den Funktionsparameter r_M kein Unterschied zwischen den einzelnen Varianten festgestellt werden. Die vier Raten variierten zwischen 0,22/Tag (1M2C) und 0,60/Tag (1C2M). Bei Betrachtung der Kapazitäten zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen der Solo-Variante mit 89,67 % und zwei der Interaktionsvarianten (1C2M: 39,37 % und C=M: 41,32 %). Mehltau konnte sich auf den Versuchszuckerrüben am stärksten ausbreiten, wenn er allein vorhanden war. Für den Parameter Anfangsbefall erreichte Mehltau in der Variante 1M2C mit 16,12 % einen signifikant höheren Befall als in den anderen beiden Interaktionsvarianten (1C2M mit 0,06 % und C=M mit 1,19 %), weil die Modellanpassung nur mit den Daten nach der Sekundärinokulation durchgeführt wurde.

Im Vergleich der Funktionsparameter für die Befallsstärke wurden bei *Cercospora*, wie schon bei der Anpassung der Befallshäufigkeit, bei keinem der drei Funktionsparameter signifikante Unterschiede festgestellt (Tab. 38). Der Befallsverlauf unterschied sich nicht zwischen Solo- und Duo-Variante.

Tab. 37. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die Funktionsparameter der **logistischen Anpassung der Befallshäufigkeit** für ***Cercospora*** und **Mehltau** in den vier Varianten: **Krankheit-Solo, C=M, 1C2M und 1M2C**. Der Vergleich der 4 Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: y_0 =Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag)

logistische Anpassung der Befallshäufigkeit von <i>Cercospora</i>				logistische Anpassung der Befallshäufigkeit von Mehltau			
Variante	y_0 (%)	K_c (%)	r_c (1/Tag)	Variante	y_0 (%)	K_M (%)	r_M (1/Tag)
Solo C (n = 4)	0,02a	88,92a	0,77a	Solo M (n = 6)	5,58ab	89,67a	0,59a
C=M (n = 5)	0,40a	85,25a	0,52a	C=M (n = 5)	1,19b	41,32b	0,29a
1C2M (n = 5)	0,29a	85,42a	0,57a	1C2M (n = 5)	0,06b	39,37b	0,60a
1M2C (n = 4)	0,001a	84,80a	0,87a	1M2C (n = 5)	16,12a	59,56ab	0,22a

Tab. 38. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die Funktionsparameter der **logistischen Anpassung** der **Befallsstärke** für **Cercospora** und **Mehltau** in den vier Varianten: Krankheit-Solo, C=M, 1C2M und 1M2C. Der Vergleich der vier Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag)

logistische Anpassung der Befallsstärke von Cercospora				logistische Anpassung der Befallsstärke von Mehltau			
Variante	y_0 (%)	K_c (%)	r_c (1/Tag)	Variante	y_0 (%)	K_M (%)	r_M (1/Tag)
Solo C (n = 4)	0,05a	60,03a	0,40a	Solo M (n = 6)	0,43a	36,57a	0,35a
C=M (n = 5)	0,10a	44,70a	0,39a	C=M (n = 5)	0,002a	1,58b	0,36a
1C2M (n = 5)	0,01a	42,33a	0,46a	1C2M (n = 4)	0,0003a	3,30b	0,69a
1M2C (n = 5)	0,002a	45,72a	0,55a	1M2C (n = 5)	0,14a	7,19b	0,57a

Bei Mehltau hingegen stellten sich nur für den Funktionsparameter Kapazität signifikante Unterschiede zwischen Solo M und den drei Kombinationen heraus. Mehltau erreichte in der Solo-Variante eine Kapazität von 36,53 %, welche im Kontrast zu den mittleren Kapazitäten von 1,58 % (C=M), 3,30 % (1C2M) und 7,19 % (1M2C) stand. Somit konnte sich Mehltau auch in der Befallsstärke gegenüber Cercospora nicht durchsetzen. Im Vergleich der anderen beiden Funktionsparameter (Anfangsbefall, Wachstumsrate) konnte kein Unterschied zwischen den Varianten festgestellt werden.

4.2.5 Die **sAUDPC**-Werte der Klimaschrankversuche

Stellte man die Box-Plots der vier untersuchten Varianten für Cercospora gegenüber, so ergaben sich kaum Unterschiede zwischen den Kombinationen (Abb. 26a). Im Vergleich der mittleren **sAUDPC**-Werte, die auf Basis der Befallsstärken in den Klimaschrankversuchen berechnet wurden, zeigte sich für die drei Interaktionsvarianten und die Solo-Variante kein signifikanter Unterschied (Tab. 39). Solo C erreichte den höchsten Wert mit 29,95 %, gefolgt von der Variante 1M2C mit 25,07 %. An dritter Position lag 1C2M mit 22,47 % und C=M erreichte mit 20,77 % den letzten Rang in dieser Reihenfolge.

Bei Mehltau sah die Situation im Vergleich der **sAUDPC**-Werte anders aus, was durch die Box-Plot Darstellung graphisch verdeutlicht wird (Abb. 26b). Hier unterschied sich die Solo M-Variante mit 15,50 % signifikant von den Kombinationsvarianten mit Werten zwischen 0,74 und 4,41 %.

Die Gegenüberstellung der beiden Krankheiten ließ einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Krankheiten erkennen. Cercospora erreichte einen **sAUDPC**-Wert, der um das 3,64-fache größer war als der **sAUDPC**-Wert von Mehltau.

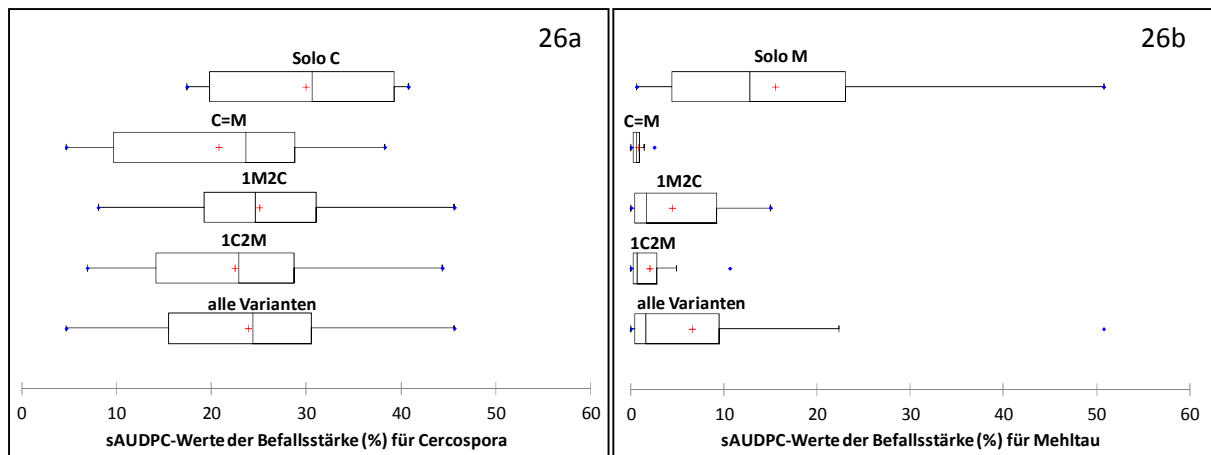


Abb. 26. Die **Box-Plots** der **sAUDPC-Werte** der **Befallsstärke (%)** für **Cercospora (a)** und **Mehltau (b)** für die vier untersuchten Varianten **Solo Krankheit, C=M, 1M2C** und **1C2M** der Klimaschrankversuche.

Tab. 39. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **sAUDPC-Werte (%)** von **Cercospora** und **Mehltau** in den vier Varianten: **Solo Krankheit, C=M, 1C2M** und **1M2C**. Der Vergleich der vier Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Der Vergleich Cercospora und Mehltau ist waagerecht in der letzten Zeile dargestellt. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant.

Cercospora			Mehltau	
Variante	sAUDPC-Wert (%)		Variante	sAUDPC-Wert (%)
Solo C (n = 11)	29,95a		Solo M (n = 28)	15,50a
C=M (n = 20)	20,77a		C=M (n = 20)	0,74b
1C2M (n = 20)	22,47a		1C2M (n = 20)	2,00b
1M2C (n = 20)	25,07a		1M2C (n = 20)	4,41b
Cercospora (n = 71)	23,88a		Mehltau (n = 88)	6,56b

4.2.6 Die tägliche Wachstumsrate der Befallshäufigkeiten für die Blattkrankheiten in den Klimaschrankversuchen

Die optische Auswertung von Abbildung 27a zeigte deutliche Unterschiede zwischen den vier untersuchten Varianten. Zudem war eine hohe Streuung der Daten festzustellen. Das Ergebnis des Tukey-Tests wies einen signifikanten Unterschied zwischen der Interaktionsvariante 1M2C (0,56/Tag) und den beiden Varianten Solo C (0,28/Tag) und C=M (0,34/Tag) auf (Tab. 40). Auch bei Mehltau war eine erkennbare Differenz zwischen den Interaktionsvarianten vorhanden (Abb. 27b). In diesem Fall unterschied sich die Solo Variante (0,33/Tag) von den beiden Duo-Varianten C=M (0,17/Tag) und 1M2C (0,16/Tag).

Vergleicht man die beiden Blattkrankheiten miteinander, so wuchs Cercospora (0,37/Tag), im Mittel über alle untersuchten Varianten, schneller als Mehltau (0,23/Tag).

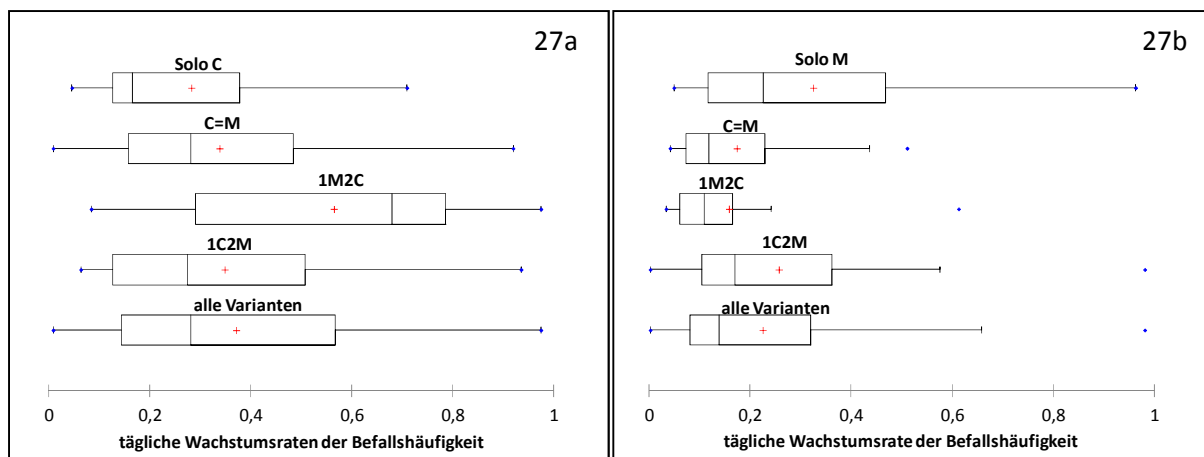


Abb. 27. Die Box-Plots der täglichen Wachstumsraten der Befallshäufigkeit für *Cercospora* (a) und *Mehltau* (b) für die vier untersuchten Varianten **Solo Krankheit**, **C=M**, **1M2C** und **1C2M** der Klimaschrankversuche.

Tab. 40. Das Ergebnis der Varianz-Analyse (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die tägliche Wachstumsrate der Befallshäufigkeit von *Cercospora* und *Mehltau* in den vier Varianten **Solo Krankheit**, **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Der Vergleich der vier Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Der Vergleich *Cercospora* und *Mehltau* ist waagerecht in der letzten Zeile dargestellt. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant.

Cercospora (Befallshäufigkeit)		Mehltau (Befallshäufigkeit)	
Variante	tägl. Wachstumsrate	Variante	tägl. Wachstumsrate
Solo C (n = 21)	0,28b	Solo M (n = 25)	0,33a
C=M (n = 45)	0,34b	C=M (n = 30)	0,17b
1C2M (n = 40)	0,35ab	1C2M (n = 20)	0,26ab
1M2C (n = 29)	0,56a	1M2C (n = 24)	0,16b
Cercospora (n = 135)		Mehltau (n = 156)	0,23b

4.2.7 Die tägliche Wachstumsrate der Befallsstärke für die Blattkrankheiten in den Klimaschrankversuchen

Der Vergleich der täglichen Wachstumsraten zeigte weder für *Cercospora* noch für *Mehltau* signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten (Tab. 41). Dieses Ergebnis wurde durch die Gegenüberstellung der Resultate mittels Box-Plot graphisch verdeutlicht (Abb. 28a und 28b). Es bestand bei beiden Krankheiten eine erhebliche Streuung der Daten. Bei *Cercospora* lagen die erreichten Raten im Mittel bei 0,28/Tag (C=M) und 0,33/Tag (1M2C) und für *Mehltau* bei 0,14/Tag (1M2C) und 0,26/Tag (C=M). Die Gegenüberstellung der Entwicklungsgeschwindigkeit beider Blattkrankheiten zeigte, dass sich *Cercospora* in den Versuchen deutlich schneller ausbreitete (0,30/Tag) als *Mehltau* (0,21/Tag). Dies wurde auch durch das Ergebnis der Varianz-Analyse bestätigt und deckte sich mit dem Ergebnis der täglichen Wachstumsrate der Befallshäufigkeit.

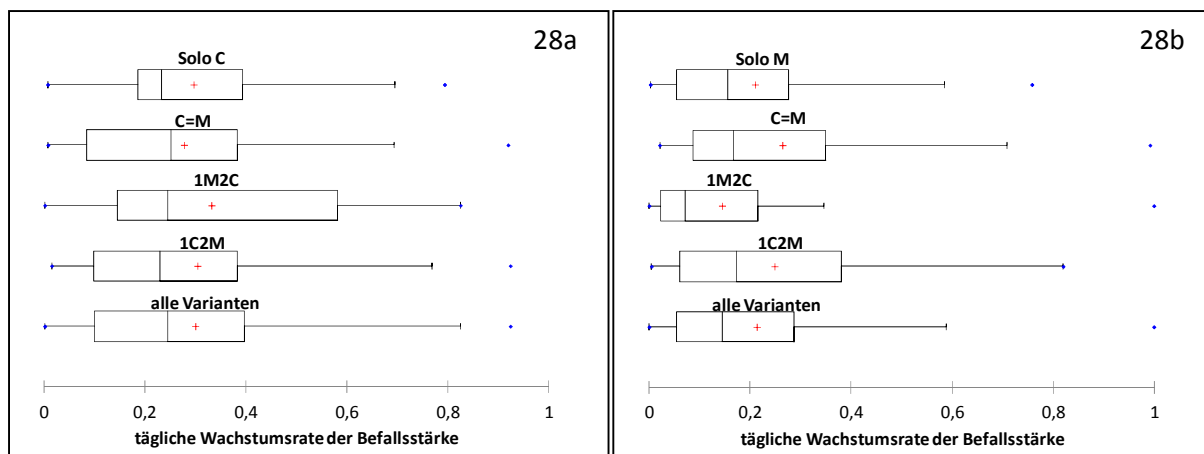


Abb. 28. Die **Box-Plots der täglichen Wachstumsraten der Befallsstärke** für **Cercospora (a)** und **Mehltau (b)** für die 4 untersuchten Varianten **Solo** Krankheit, **C=M**, **1M2C** und **1C2M** der Klimaschrankversuche.

Tab. 41. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **tägliche Wachstumsrate der Befallsstärke** von **Cercospora** und **Mehltau** in den 4 Varianten: Krankheit-**Solo**, **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Der Vergleich der 4 Varianten erfolgt senkrecht in der Spalte. Der Vergleich Cercospora und Mehltau ist waagerecht in der letzten Zeile dargestellt. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant.

Cercospora (Befallsstärke)		Mehltau (Befallsstärke)	
Variante	tägl. Wachstumsrate	Variante	tägl. Wachstumsrate
Solo C (n = 21)	0,30a	Solo M (n = 53)	0,21a
C=M (n = 45)	0,28a	C=M (n = 40)	0,26a
1C2M (n = 40)	0,30a	1C2M (n = 24)	0,25a
1M2C (n = 29)	0,33a	1M2C (n = 39)	0,14a
Cercospora (n = 135)		Mehltau (n = 156)	0,21b

4.2.8 Das Ergebnisse zum Einfluss eines einmaligen Regenereignisses zur Simulation einer Sprühinokulation auf den Befallsverlauf des Rübenmehltaus

Neben einer unbehandelten Kontrollvariante wurden insgesamt vier verschiedene Varianten untersucht, die sich im Abstand der Behandlung mit Wasser unterschieden (7, 10, 15 und 22 Tage nach Inokulation). Die Ergebnisse der Mehltaubonitur vor und nach der Inokulationssimulation sind in Tabelle 42 aufgeführt. Variante 1 mit 7 Tagen entsprach dem Inokulationsabstand der Variante 1M2C. Hier konnte 48 Stunden nach der Benetzung mit Wasser ein Rückgang der mittleren Befallshäufigkeit um 10 % festgestellt werden. Die mittlere Befallsstärke hingegen zeigte einen Anstieg um 0,66 %, das hieß, dass an einigen Blättern der Myzelbelag komplett abgewaschen wurde, dies aber durch die Befallszunahme anderer befallener Blätter mehr als ausgeglichen wurde. Die reduzierte Befallshäufigkeit erholte sich bereits nach 96 Stunden. Mehltau erreichte bei dieser

zweiten Bonitur den Ausgangswert von 81 % Befallshäufigkeit. Die mittlere Befallsstärke wuchs zu diesem Termin um weitere 2,51 auf 3,4 % an. Dieser Trend setzte sich mit einer Steigerung der Befallshäufigkeit (+3 %) und der Befallsstärke (+7,62 %) im Vergleich zur Bonitur vor der Behandlung fort.

Für Variante 2, die nach 10 Tagen mit Wasser behandelt wurde, konnte nach 48 Stunden kein Rückgang der mittleren Befallshäufigkeit bzw. Befallsstärke festgestellt werden. Beide Werte stiegen im Mittel um 3 % (BH) bzw. 0,65 % (BS). Diese positive Entwicklung setzte sich auch bei zwei weiteren Bonituren fort, die jeweils einen Anstieg verzeichnete.

Bei Variante 3 (15 Tage Abstand) zeigte sich ein anderes Bild. Nach 48 Stunden war ein Rückgang um 9 % in der Befallshäufigkeit zu erkennen. Die Befallsstärke hingegen wuchs um insgesamt 0,83 %. In der Bonitur nach 72 Stunden war noch keine Erholung der Befallshäufigkeit zu erkennen. Das Niveau blieb konstant bei 75 %. Im Gegensatz dazu stand die Befallsstärke. Sie wuchs im Vergleich zur Bonitur vor der Behandlung um 2,26 %.

Tab. 42. Der **Vergleich** der mittleren **Befallshäufigkeit (%)** und der **Befallsstärke (%)** **vor und nach der Behandlung mit Wasser** für die vier verschiedenen Varianten mit 7, 10, 15 und 22 Tagen Abstand zwischen Inokulation und Behandlung.

Variante	Abstand zw. Inokulation und Wassereinfluss (Tage)		mittlere Befalls- häufigkeit (%)	Differenz zw. vorher und später (%)	mittlere Befalls- stärke (%)	Differenz zw. vorher und später (%)
1	7	vorher	81		0,89	
		48h später	71	-10	1,55	+0,66
		96h später	81	+0	3,40	+2,51
		144h später	84	+3	8,51	+7,62
2	10	vorher	74		2,03	
		48h später	77	+3	2,68	+0,65
		96h später	82	+8	4,86	+2,83
		144h später	83	+9	8,44	+6,42
3	15	vorher	84		2,51	
		48h später	75	-9	3,34	+0,83
		72h später	75	-9	4,77	+2,26
		144h später	89	+5	10,76	+8,25
4	22	vorher	98		31,72	
		48h später	98	0	30,02	-1,70
		72h später	98	0	33,07	+1,35
		144h später	98	0	39,80	+8,08

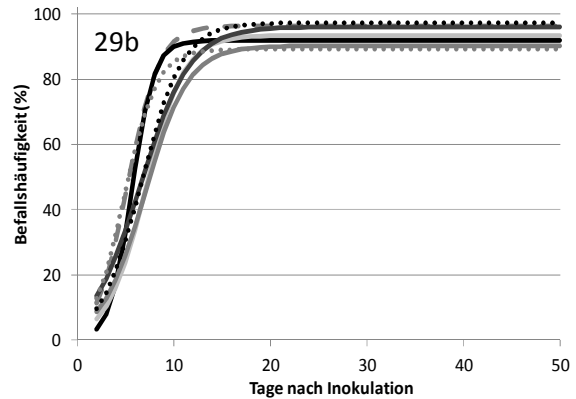
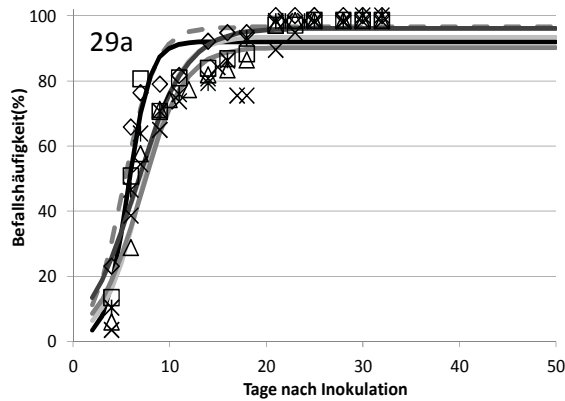
Bei der Bewertung der Befallshäufigkeit nach 144 Stunden konnte ein positiver Trend verzeichnet werden. Die Befallshäufigkeit stieg auf 89 %, ein Plus von 5 % im Vergleich zum Ausgangswert von 84 %. Auch bei der Befallsstärke nahm der Mehltau weiter zu. Hier wurde eine mittlere Befallsstärke von 10,76 % erreicht.

Variante 4 mit 22 Tagen Abstand blieb in der Befallshäufigkeit für alle drei Boniturtermine nach der Behandlung konstant bei 98 %. Es fand kein Rückgang aber auch keine Zunahme statt. Dagegen war in der Befallsstärke erstmals ein Rückgang um –1,7 % nach 48 Stunden zu verzeichnen, wobei dieser bereits nach 72 Stunden wieder eingeholt war. Im Vergleich zur Bonitur vor der Wasserbehandlung stieg der Wert um 1,35 %. Dies setzte sich beim 3. Kontrolltermin fort. Die mittlere Befallsstärke wuchs um weitere 6,73 % von 33,07 auf 39,8 %.

Insgesamt konnte festgehalten werden, dass es durch den Einfluss von Wasser, in Form von Niederschlag oder einer Inokulation, zu einem Rückgang der Befallshäufigkeit und auch der Befallsstärke kommen kann. Es gab aber keinen Zusammenhang zwischen Ausgangsbefall und Befall nach dem Wasserereignis bzw. zwischen Inokulationsabstand und dem Befall nach der Behandlung.

Der Vergleich der Befallshäufigkeiten zwischen den Varianten 1 bis 4 und der Kontrolle zeigte im Kurvenverlauf keine Unterschiede, trotz Behandlung mit Wasser (Abb. 29a). Auch die logistischen Anpassungen der Befallsverläufe wiesen keine großen Schwankungen auf. Der Anfangsbefall variierte zwischen 0,6 % (Variante 1) und 6,7 % (Variante 4) (Tab. 43) und hatte damit eine geringere Spannweite, als der Anfangsbefall in den Solo-Versuchen von 25_Aug_2010 bis 25_Mai_2012_3 (Bereich 0,02 bis 16,52 %, Tab. 18). Was die Versuche miteinander verband, war die geringe Signifikanz (P-Wert) des geschätzten Anfangsbefalls im Vergleich zu den Parametern Kapazität und Wachstumsrate. Die Kapazität erreichte in allen Versuchsdurchgängen Werte zwischen 90,09 % (Variante 3) und 96,46 % (Kontrolle). Auch hier war in den anderen Solo-Varianten des gleichen Temperaturbereiches ein größerer Wertebereich der Kapazitäten vorhanden (71,57 bis 100 %). Dafür war die höchste Signifikanz der zu schätzenden Parameter erneut bei den Kapazitäten vorzufinden. Im Vergleich der vier Varianten und der Kontrolle zeigte sich kein Zusammenhang zwischen Behandlungsabstand und maximaler Befallshäufigkeit.

Die Wachstumsrate nahm im Abwaschungsversuch Werte zwischen 0,39/Tag (Variante 4) und 0,88/Tag (Variante 1) an. Bei den vergleichbaren Solo-Varianten lagen die Werte zwischen 0,16 und 1,76/Tag (Tab. 18). Wie schon bei der logistischen Anpassung der Interaktionsversuche, so fiel auch bei dieser Analyse auf, dass ein hoher Startwert mit einer niedrigen Rate korrelierte und umgekehrte (Bsp. 0,6 % und 0,88/Tag sowie 6,7 % und 0,39/Tag).



◇ DP_Kontrolle — log. Anp. Kontrolle □ DP_7 Tage — log. Anp. 7 Tage ... log. Anp. 25_Mai_2012_1
 △ DP_10 Tage — log. Anp. 10 Tage × DP_15 Tage — log. Anp. 15 Tage ... log. Anp. 25_Nov_2011
 ✕ DP_22 Tage — log. Anp. 22 Tage

Abb. 29. Der **Verlauf der Befallshäufigkeit** für **Mehltau** in Abhängigkeit von den Tagen nach der Inokulation bei 25 °C in der **Solo-Variante**. In (a) sind neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) für die vier unterschiedlichen Behandlungstermine mit Wasser, zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt. In (b) werden die vier logistischen Anpassungen (durchgängige und gestrichelte Linien) des Abwaschungsversuches mit Kurvenanpassungen von zwei unabhängigen Solo M Varianten (gepunktete Linien) aus Abschnitt 4.2.1.2 verglichen.

Tab. 43. Die **Auflistung der geschätzten Parameterwerte** der **logistischen Anpassungen** an die **Befallshäufigkeit** von **Mehltau** im Abwaschungsversuch. Abk.: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Kontrolle	3,57	2,533	0,186	96,46	2,061	<0,0001	0,62	0,126	0,0005	0,962
1	0,6	0,92	0,526	91,93	2,742	<0,0001	0,88	0,256	0,005	0,999
2	2,47	1,805	0,196	93,49	2,692	<0,0001	0,51	0,102	0,0003	0,966
3	3,71	3,148	0,261	90,27	3,267	<0,0001	0,45	0,123	0,003	0,945
4	6,7	3,732	0,098	96,09	2,632	<0,0001	0,39	0,084	0,0006	0,961

Ein Vergleich der logistischen Kurvenanpassung (Abb. 29b) des Abwaschungsversuches mit den zwei Versuchen 25_Nov_2011 und 25_Mai_2012_1 aus dem Vergleich der Solo-Varianten, deren unterschiedlicher Kurvenverlauf insbesondere bei der Befallsstärke zum Tragen kam (vergleiche Abschnitt 4.2.2.2), zeigte bei der Entwicklung der Befallshäufigkeit keine Unterschiede. Die mittlere Befallshäufigkeit war demzufolge in diesem Fall eine robuste Kennzahl zur Beschreibung einer Epidemieentwicklung.

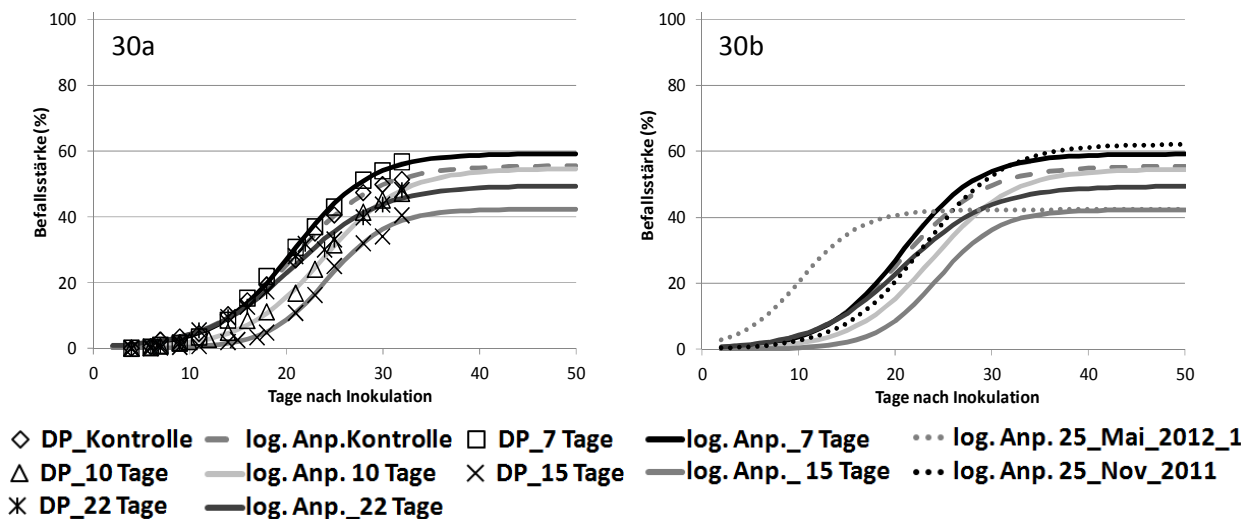


Abb. 30. Der **Verlauf der Befallsstärke** für **Mehltau** in Abhängigkeit von der Zeit (Tage) nach der Inokulation bei 25 °C in der **Solo-Variante**. In (a) sind neben den Datenpunkten (DP) der Bonituren (Markierungsoptionen) für die vier unterschiedlichen Behandlungstermine mit Wasser, zusätzlich jeweils die geschätzten logistischen Anpassungen (Linien) dargestellt. In (b) werden die vier logistischen Anpassungen (durchgängige und gestrichelte Linien) des Abwaschungsversuches Kurvenanpassungen von zwei unabhängigen Solo M Varianten (gepunktete Linien) aus Abschnitt 4.2.2.2 verglichen.

Tab. 44. Die **Auflistung der geschätzten Parameterwerte** der **logistischen Anpassungen** an die **Befallsstärken** von **Mehltau** im Abwaschungsversuch. Abkürzungen: y_0 = Anfangsbefall (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), SE = Standardfehler, p = P-Wert, R^2 = Bestimmtheitsmaß

Versuch	y_0 (%)	SE	p	K (%)	SE	p	r (1/Tag)	SE	p	R^2
Kontrolle	0,43	0,07	<0,0001	55,51	1,076	<0,0001	0,23	0,009	<0,0001	0,999
1	0,32	0,079	0,002	59,16	1,445	<0,0001	0,25	0,013	<0,0001	0,999
2	0,16	0,038	0,001	54,62	1,665	<0,0001	0,24	0,011	<0,0001	0,999
3	0,02	0,01	0,062	42,28	1,582	<0,0001	0,31	0,022	<0,0001	0,998
4	0,5	0,212	0,037	49,43	2,843	<0,0001	0,22	0,024	<0,0001	0,994

Vergleicht man die Entwicklung der Befallsstärken des Abwaschungsversuches unter Zuhilfenahme der logistischen Anpassung (Tab. 44), so zeigte sich für den Anfangsbefall ein Wertebereich zwischen 0,02 % (Variante 3) und 0,5 % (Variante 4). Setzte man die Spannweite dem Bereich der anderen Solo M Varianten gegenüber (0,00004 bis 1,88 %, Tab 28), so war dieser deutlich größer.

Die Kapazitäten der verschiedenen Varianten nahmen Werte zwischen 42,28 % (Variante 3) und 59,16 % (Variante 1) an, was einer Differenz von 16,88 % zwischen Minimum und Maximum entsprach.

Dieser Unterschied konnte auch in den anderen Solo-Varianten festgestellt werden, was durch den Vergleich der Beispielfälle 25_Nov_2011 und 25_Mai_2012_1 in Abbildung 30b deutlich wurde. Ein

Zusammenhang zwischen Inokulationsabstand und Kapazität konnte in der Gegenüberstellung der Varianten nicht erkannt werden. Im Gegensatz dazu stand die vorhandene Beziehung zwischen Anfangsbefall und Wachstumsrate, die auch in diesem Fall beobachtet wurde.

Die Wachstumsraten der vier Varianten und der Kontrolle variierten im Bereich von 0,22/Tag (Variante 4) und 0,31/Tag (Variante 3). Dies spiegelte den Wertebereich wider, der auch bei den vergleichbaren Solo M Versuchen berechnet wurde (0,23 bis 0,48/Tag, Tab 28). Auch für diesen Funktionsparameter konnte kein Zusammenhang zwischen Inokulationsabstand und Geschwindigkeit der Epidemie festgestellt werden. Für die Wachstumsrate wie auch für die Kapazität lagen in allen Fällen hohe Signifikanzen der Schätzungen vor (P-Wert <0,0001). Die Wahl des logistischen Modells zur Beschreibung der Befallsverläufe zeigte eine gute Übereinstimmung, was durch Bestimmtheitsmaße von 0,994 bis 0,999 bestätigt wurde.

Zusätzlich zu den logistischen Anpassungen der Befallsstärken des Abwaschungsversuches sind in Abbildung 30b die zwei in Abschnitt 4.2.2.2 festgestellten Kurventypen der logistischen Anpassung für Solo M mit einer Kapazität von über 10 % Befallsstärke (Beispielkurven der Versuche 25_Nov_2011 und 25_Mai_2012_1) dargestellt. Der Vergleich der Kurven zeigte, dass der Versuch 25_Nov_2011 eine ähnliche Mehltauentwicklung aufwies, wie die fünf Epidemien des Abwaschungsversuches. Der Versuch 25_Mai_2012_1 hatte hingegen einen etwas anderen Verlauf. Das erreichte Kapazitätsniveau (42,57 %) und auch die Wachstumsrate (0,30/Tag) waren vergleichbar mit Variante 3 (Kapazität: 42,28 %, Rate: 0,31/Tag). Die beiden Versuche unterschieden sich jedoch im Anfangsbefall, der bei 25_Mai_2012_1 mit 1,88 % um das 94-fache höher lag, als der Anfangsbefall von Variante 3 mit 0,02 %. Dies führte dazu, dass Mehltau im Versuch 25_Mai_2012_1 die Kapazität viel früher erreichte als im Versuchsdurchgang der Variante 3. Zusammenfassend kann über den Vergleich der verschiedenen Mehltau-Epidemien gesagt werden, dass die mittlere Befallsstärke eine sensible Kennzahl zur Beschreibung der Krankheitsentwicklung war, da sie auf ein einmaliges Regenereignis stärker reagiert als die Befallshäufigkeit.

4.3 Der Vergleich der Feld- und Klimaschrankergebnisse

4.3.1 Der Vergleich der *sAUDPC*-Werte

In dieser Auswertung wurden zum einen die Ergebnisse jeder Krankheit im Feld und im Klimaschrank verglichen und zum anderen die beiden Krankheiten gegenübergestellt. Im ersten Teil des Vergleichs zeigte *Cercospora* (Abb. 31, oberhalb der gestrichelten Linie) deutliche Unterschiede zwischen den Feldbeobachtungen und den Klimaschrankversuchen. *Cercospora* erreichte im Feld deutlich

niedrigere Befallsstärken, als dies in den Klimaschrankversuchen der Fall war (Tab. 45). Die Solo-Variante und die Duo-Varianten der Klimaschrankversuche befanden sich im Gegensatz dazu auf einem Niveau. Der erreichte Mittelwert lag für *Cercospora* in der Duo-Variante im Feld (C Feld_Duo) bei 2,34 %, in der Duo-Variante im Klimaschrank (C KS_Duo) bei 22,77 % und in der Solo-Variante im Klimaschrank (C KS_Solo) bei 29,95 %.

Auch bei Mehltau wiesen die drei untersuchten Fälle deutliche Unterschiede auf (Abb. 31, unterhalb der gestrichelten Linie). Hier unterschieden sich sogar alle signifikant voneinander. In der Solo-Variante im Klimaschrank (M KS_Solo) hatte Mehltau einen Wert von 15,50 %, in der Duo-Variante lag der Wert bei 2,38 % klar drunter und bei den Felderhebungen (M Feld_Duo) eindeutig drüber, mit 23,01 %.

Der zweite Teil des Vergleichs zwischen den beiden Krankheiten zeigte auf, dass der erreichte Mittelwert von Mehltau in der Duo-Variante im Feld (M Feld_Duo) gleich auf lag mit den beiden *Cercospora*-Varianten im Klimaschrankversuch (C KS_Duo und C KS_Solo). Zu diesen drei unterschied sich Mehltau im Klimaschrankversuch (M KS_Solo und M KS_Duo).

Die geringsten *sAUDPC*-Werte im Mittel erreichte *Cercospora* unter Feldbedingungen und Mehltau in den Duo-Varianten unter kontrollierten Laborbedingungen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass *Cercospora* im Klimaschrankversuch, unter kontrollierten Bedingungen, höhere Befallsstärken erreichte und Mehltau, genau im Gegenteil, unter variablen Bedingungen im Feld.

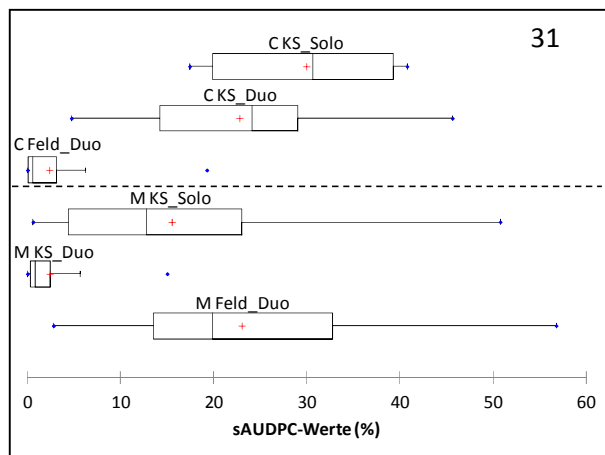


Abb. 31. Der Vergleich der *sAUDPC*-Werte der Befallsstärke (%) für *Cercospora* (oberhalb der gestrichelten Linie) und für Mehltau (unterhalb der gestrichelten Linie). Unterscheidung der Fälle: Krankheit-Solo im Klimaschrankversuch im jeweils obersten Box-Plot (Solo M oder Solo C), Krankheit-Duo im Klimaschrankversuch im jeweils mittleren Box-Plot (zusammengefasst C=M, 1C2M und 1M2C) und Krankheit-Duo aus den Felderhebungen im jeweils untersten Box-Plot (C=M, 1C2M und 1M2C). Abk. M = Mehltau, C = *Cercospora*, KS = Basis Klimaschrankdaten, Feld = Basis Felddaten.

Tab. 45. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **sAUDPC-Werte (%)** von **Cercospora** und **Mehltau** in den jeweils drei untersuchten Gruppen. Unterscheidung der Fälle: Krankheit-Solo im Klimaschrankversuch (Solo M oder Solo C), Krankheit-Duo im Klimaschrankversuch (zusammengefasst C=M, 1C2M und 1M2C) und Krankheit-Duo aus den Felderhebungen (C=M, 1C2M und 1M2C). Abk. M = Mehltau, C = Cercospora, KS = Basis Klimaschrankdaten, Feld = Basis Felddaten. Die Mittelwerte, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant.

Variante	sAUDPC-Wert (%)
M KS_Solo (n = 28)	15,50b
M KS_Duo (n = 60)	2,38c
M Feld_Duo (n = 28)	23,01a
C KS_Solo (n = 12)	29,95a
C KS_Duo (n = 60)	22,77a
C Feld_Duo (n = 28)	2,34c

4.3.2 Der Vergleich der täglichen Wachstumsraten für Befallshäufigkeit und Befallsstärke

Die täglichen Wachstumsraten der Befallshäufigkeiten zeigten im graphischen wie auch im statistischen Vergleich deutliche Unterschiede auf (Abb. 32 und Tab. 46). Für Cercospora unterschieden sich die Raten der Felderhebungen (0,15/Tag) signifikant von den Raten, die in den Klimaschrankversuchen festgestellt wurden (0,28 und 0,39/Tag). Bei Mehltau lag der Unterschied nicht zwischen Feld und Labor, sondern zwischen Solo-Variante (0,32/Tag) und Duo-Varianten (beide 0,19/Tag). Die Gegenüberstellung von Cercospora und Mehltau in der Box-Plot-Darstellung dokumentierte ein etwas schnelleres Wachstum von Cercospora gegenüber Mehltau (Abb. 32a).

Der Vergleich der täglichen Wachstumsraten der Befallsstärke zeigte im Gegensatz zur Befallshäufigkeit für Mehltau, dass alle Raten auf gleichem Niveau lagen (0,21, 0,22 und 0,23/Tag). Cercospora entwickelte sich im Durchschnitt in den Duo-Varianten im Klimaschrank schneller (0,30/Tag) als in den Duo-Varianten der Felderhebung (0,19/Tag). Die Box-Plot-Analyse zeigte in diesem Fall für Cercospora in den Klimaschrankversuchen eine etwas schnellere Entwicklung als für Mehltau in den Gruppen der Feld- und Laborerhebung (Abb. 32b).

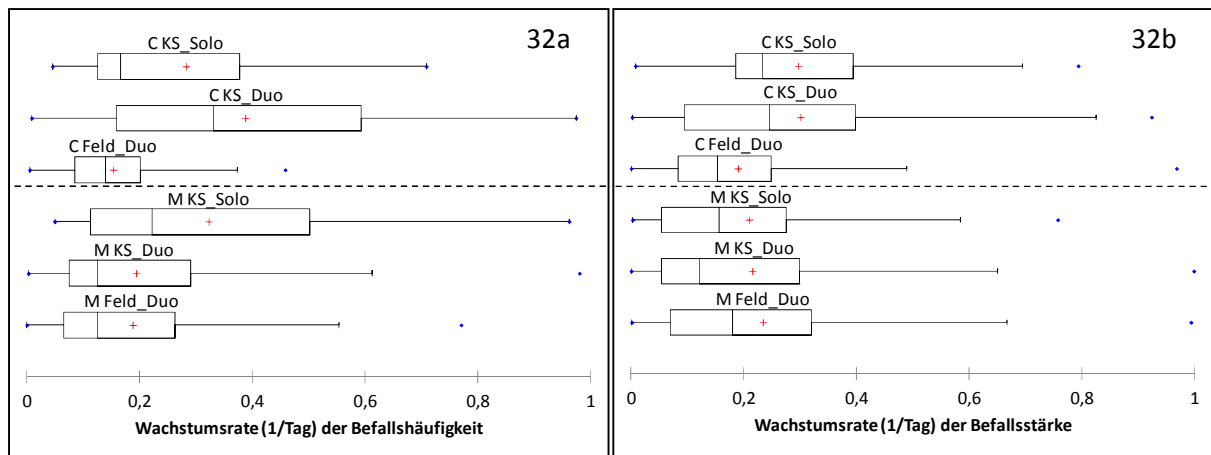


Abb. 32. Der **Vergleich der täglichen Wachstumsrate** für die **Befallshäufigkeit (a)** und die **Befallsstärke (b)** für **Cercospora** (oberhalb der gestrichelten Linie) und für **Mehltau** (unterhalb der gestrichelten Linie). Unterscheidung der Fälle Krankheit-Solo im Klimaschrankversuch (Solo M oder Solo C), Krankheit-Duo im Klimaschrankversuch (C=M, 1C2M und 1M2C) und Krankheit-Duo aus den Felderhebungen (C=M, 1C2M und 1M2C). Abk. M = Mehltau, C = Cercospora, KS = Basis Klimaschrankdaten, Feld = Basis Felddaten.

Tab. 46. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) für die **tägliche Wachstumsrate** (1/Tag) der **Befallshäufigkeit (links)** und der **Befallsstärke (rechts)** von **Cercospora** und **Mehltau**. Der statistische Vergleich zwischen Feld und Klimaschrank wurde nicht krankheitsübergreifend durchgeführt. Unterscheidung der Fälle: Krankheit-Solo im Klimaschrankversuch (Solo M oder Solo C), Krankheit-Duo im Klimaschrankversuch (zusammengefasst C=M, 1C2M und 1M2C) und Krankheit-Duo aus den Felderhebungen (C=M, 1C2M und 1M2C). Abk. M = Mehltau, C = Cercospora, KS = Basis Klimaschrankdaten, Feld = Basis Felddaten. Die Mittelwerte die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant.

Befallshäufigkeit		Befallsstärke	
Variante	tägl. Wachstumsrate	Variante	tägl. Wachstumsrate
M KS_Solo (n = 24)	0,32a	M KS_Solo (n = 53)	0,21a
M KS_Duo (n = 75)	0,19b	M KS_Duo (n = 103)	0,22a
M Feld_Duo (n = 113)	0,19b	M Feld_Duo (n = 173)	0,23a
C KS_Solo (n = 14)	0,28a	C KS_Solo (n = 21)	0,297ab
C KS_Duo (n = 74)	0,39a	C KS_Duo (n = 114)	0,301a
C Feld_Duo (n = 140)	0,15b	C Feld_Duo (n = 178)	0,19b

4.4 Die Modellierung der Interaktion der zwei Blattkrankheiten

4.4.1 Die Interaktionsmodelle auf Basis der Befallshäufigkeit

4.4.1.1 Das Interaktionsmodell für die Variante C=M

Insgesamt wurden für die Variante C=M fünf Interaktionsversuche durchgeführt (Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011_1, Nov_2011_2 und Mai_2012). Die Ergebnisse sowie die Approximation durch das Interaktionsmodell (Gleichung 20 bis 23) sind in den Abbildungen 33a bis e graphisch dargestellt. Trotz gleichzeitiger Inokulation in der Variante C=M trat Mehltau in allen fünf Versuchen wegen der kürzeren Inkubationszeit früher auf als Cercospora. Das frühere Erstauftreten spiegelte sich auch in den geschätzten Anfangsbefallswerten für die Solo- und Duo-Varianten wider (CO_{Solo} , MO_{Solo} und MO_{Duo}) (Tab. 47 und 48). Für die Modellierung von Mehltau wurden anstatt einem, zwei Startwerte verwendet, weil die Sprühinokulation mit Cercospora den biotrophen Pilz in seiner Entwicklung innerhalb der Kombinationsvariante beeinträchtigte, was die Differenzen zwischen MO_{Solo} und MO_{Duo} bestätigen.

Der Anfangsbefall für Mehltau variierte zwischen 3,88 und 33,72 % in der Solo-Variante sowie zwischen 0,06 und 2,86 % in der Duo-Variante. Für die Ergebnisse der Versuche Sept_2011_1 und Sept_2011_2 muss berücksichtigt werden, dass gemittelte Befallswerte der anderen Versuche als Solo-Varianten eingesetzt wurden, da für diese beiden Durchgänge keine eigenen Solo-Varianten vorhanden waren (vergleiche Abschnitt 3.4.1). Dies erklärte in den beiden ersten Versuchen auch die hohen Differenzen zwischen MO_{Solo} und MO_{Duo} .

Bei Cercospora lag der Startwert zwischen 0,002 bis 0,1 %, was im Vergleich zu Mehltau einen zeitlichen Vorsprung in der Etablierungsphase der Blattkrankheiten bedeutete.

Prüft man die maximale Befallshäufigkeiten der beiden Krankheiten in der graphischen Darstellung, so zeigte sich zwischen den fünf Versuchen ein etwas unterschiedliches Bild. In den beiden Versuchen Sept_2011_1 und Sept_2011_2 (Abb. 33a und b) erlangten beide Krankheiten deutlich höhere Befallshäufigkeiten in den Solo-Varianten als in der Duo-Variante. Dabei erreichte Mehltau eine geringere Kapazität als Cercospora in der Interaktionsvariante. In den zwei Versuchen Nov_2011_1 und Nov_2011_2 (Abb. 33c und d) befiel Cercospora in der Interaktionsvariante hingegen mehr Blätter, als dies in der Solo-Variante der Fall war. Mehltau hatte auch in diesem Fall in der Duo-Variante eine geringere Befallshäufigkeit als in der Solo-Variante. Dieses Bild setzte sich für Mehltau im fünften Versuch (Mai_2012) fort (Abb. 33e). Im Gegensatz dazu erreichte Cercospora in der Solo- und in der Duo-Variante des Versuches Mai_2012 das gleiche Endbefallsniveau. Vergleicht man ausschließlich die geschätzten Kapazitäten der Solo-Varianten (Tab. 47 und 48), so befiel Mehltau in vier von fünf Versuchen (80 %) mehr Blätter als Cercospora. Im fünften Fall war die

Befallssituation genau umgekehrt. Dieses Verhältnis drückte sich ebenfalls im Vergleich der Mittelwerte aus. Mehltau erreichte, gemittelt über alle Versuche, eine Kapazität von 94,99 %. *Cercospora* lag mit 87,91 % genau 7,08 % darunter.

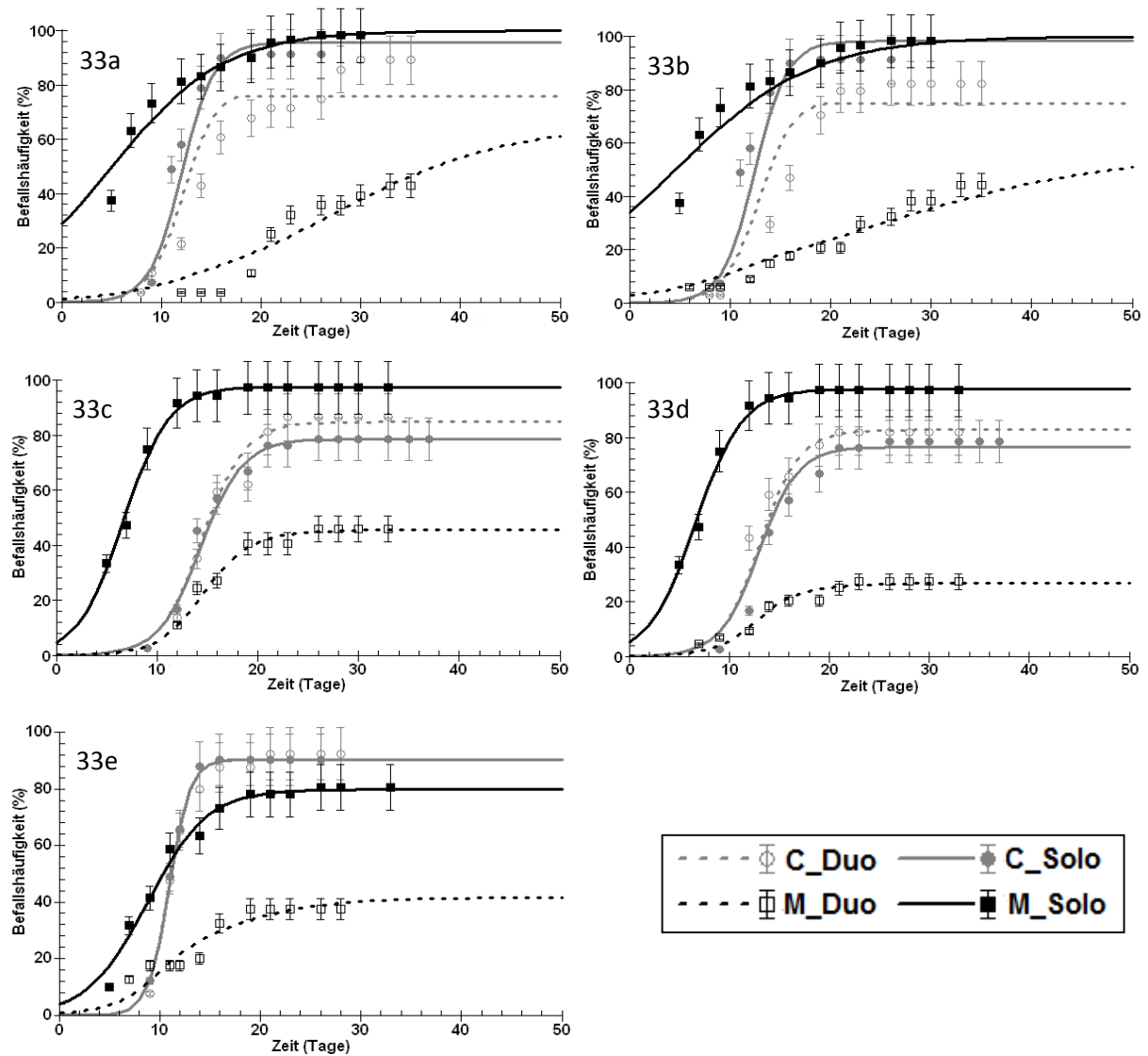


Abb. 33. Die graphische Darstellung des **Interaktionsmodells** auf Basis der **Befallshäufigkeit** für die Versuche Sept_2011_1 (a), Sept_2011_2 (b), Nov_2011_1 (c), Nov_2011_2 (d) und Mai_2012 (e) der Variante **C=M**.

Tab. 47. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Cercospora**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die Variante **C=M** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (-) der Parameter wurde für diese Variante nicht benötigt, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	CO_{Solo} (%) zu t_0	SE	CO_{Duo} (%) zu t_0	SE	K_C (%)	SE	r_C (1/Tag)	SE	α_{CM}	SE		$r_C K_C$ (%/Tag)	
Sept_2011_1	0,056	0,086	-	-	95,80*	4,029	0,62*	0,13	1,15*	0,403		59,40	
Sept_2011_2	0,04	0,071	-	-	98,29*	4,282	0,62*	0,135	0,98*	0,256		60,94	
Nov_2011_1	0,08	0,054	-	-	78,51*	1,295	0,48*	0,048	-0,14*	0,042		37,68	
Nov_2011_2	0,1	0,087	-	-	76,49*	1,389	0,51*	0,064	-0,24*	0,077		39,01	
Mai_2012	0,002	0,003	-	-	90,46*	1,372	0,96*	0,102	0,005	0,051		86,84	
$\bar{x}$ (SD)	0,06	(0,04)			87,91	(9,94)	0,64	(0,19)	0,35	(0,66)		56,77	(20,05)

Tab. 48. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Mehltau**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die Variante **C=M** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	MO_{Solo} (%) zu t_0	SE	MO_{Duo} (%) zu t_0	SE	K_M (%)	SE	r_M (1/Tag)	SE	α_{MC}	SE		$r_M K_M$ (%/Tag)	
Sept_2011_1	28,64*	9,772	1,19	1,027	100,00*	5,571	0,18*	0,060	0,46*	0,168		18,00	
Sept_2011_2	33,72*	9,805	2,86	1,857	100,00*	6,812	0,15*	0,054	0,58*	0,165		15,00	
Nov_2011_1	4,68*	1,557	0,06	0,045	97,52*	1,271	0,45*	0,048	0,61*	0,028		43,88	
Nov_2011_2	5,17*	1,976	0,09	0,067	97,65*	1,46	0,43*	0,056	0,85*	0,038		41,99	
Mai_2012	3,88*	1,165	0,68*	0,271	79,80*	1,478	0,34*	0,035	0,42*	0,026		27,13	
$\bar{x}$ (SD)	15,22	(14,69)	0,98	(1,15)	94,99	(8,58)	0,31	(0,14)	0,58	(0,17)		29,20	(13,33)

Tab. 49. Das **Ergebnis der statistischen Analyse** der Modelloptimierung für die Variante **C=M** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: R^2 = Bestimmtheitsmaß, WSS = Weighted sum of square, MSM = Model mean square, MSR = Residual mean square

Versuch	R^2	residual WSS	total WSS	MSM	MSR
Sept_2011_1	0,9457	2486,27	45747,93	5407,71	69,06
Sept_2011_2	0,9439	2969,30	52890,48	6240,15	76,14
Nov_2011_1	0,9860	484,87	34630,38	4268,19	13,10
Nov_2011_2	0,9858	649,72	45641,54	5623,98	16,66
Mai_2012	0,9896	370,33	35461,16	4386,35	11,22

Stellte man die Wachstumsraten der fünf Interaktionsversuche gegenüber, so entwickelte sich Mehltau in keinem der Fälle schneller im Bestand als Cercospora. Bei Mehltau variierte die Rate zwischen 0,18 und 0,45/Tag, bei Cercospora zwischen 0,48 und 0,96/Tag. Wie schon bei der Anpassung der Daten mit der logistischen Funktion beobachtet, war die Rate umso höher je niedriger der Anfangsbefall war und umgekehrt. Ein Zusammenhang zwischen den beiden Parametern ist auch im modifizierten LV-Modell vorhanden.

Die Verbindung der Ergebnisse von Kapazität und Wachstumsrate für die jeweilige Krankheit (Faktoren $r_C K_C$ und $r_M K_M$) ergab für die beiden Versuche im September und den Versuch im Mai eine höhere absolute Rate für Cercospora. Bei den zwei Versuchen im November konnte Mehltau die höhere absolute Rate vorweisen. Diese zusammenhängende Betrachtungsweise wich von den Einzelergebnissen für die geschätzte Kapazität und die Wachstumsrate der beiden Krankheiten ab. Bei der Kapazität hatte Mehltau Vorteile, bei der Wachstumsrate erreichte Cercospora höhere Werte.

Der Konkurrenzkoeffizient, der den Einfluss der jeweils anderen Krankheit beschreibt, zeigte in drei der fünf Versuche einen deutlich höheren Effekt von Cercospora auf Mehltau (a_{MC} , Tab. 48) als umgekehrt (a_{CM} , Tab. 47). Die anderen beiden Fälle mit einem höheren a_{CM} gehörten zu den September-Versuchen, deren Solo-Varianten aus den anderen Versuchen gemittelt wurden und somit als Referenzgröße kritisch betrachtet werden müssen. In den beiden November-Versuchen nahm der Konkurrenzkoeffizient a_{CM} sogar signifikant negative Werte an (−0,14 bis −0,24). Demzufolge konnte die Beziehung der beiden Krankheiten in diesen Fällen als Förderung von Cercospora durch Mehltau verstanden werden.

Die Präzision der geschätzten Funktionsparameter war für die Werte der Kapazität am höchsten. An zweiter Position lagen die Wachstumsraten, gefolgt von den Konkurrenzkoeffizienten. Für den zuletzt genannten Funktionsparameter waren bis auf einen Fall alle geschätzten Werte signifikant von Null verschieden. Die geringste Präzision wiesen die Werte des Anfangsbefalls der Solo- und Duo-Varianten auf, was die geringen Signifikanzen bestätigten.

Das Bestimmtheitsmaß zwischen 0,9439 und 0,9896 zeigte eine hohe Übereinstimmung zwischen Daten und gewähltem modifizierten LV-Modell auf (Tab. 49). Eine Aussage über die Qualität der Datenanpassung konnte ebenso über die Residuenquadratsummen (MSR) gemacht werden. Für diese Maßeinheit gilt, je kleiner der betrachtete Wert, desto besser die Modellanpassung. Die Residuenquadratsummen variierten für die Variante C=M zwischen 11,22 und 76,14 und stimmten mit der Rangfolge der Übereinstimmung des Bestimmtheitsmaßes überein. Die September-Versuche waren aufgrund dieser Bewertung in ihrer Anpassung deutlich schlechter zu beurteilen als die restlichen drei Versuchsdurchgänge.

4.4.1.2 Das Interaktionsmodell für die Variante 1C2M

Insgesamt konnten für die Variante 1C2M fünf Interaktionsversuche durchgeführt werden (Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012). Obwohl die Solo-Varianten mit einem Abstand von 7 Tagen inokuliert wurden, begann die Ausbreitung der zweiten Krankheit Mehltau mit deutlich höheren Befallshäufigkeiten als die zuerst auf die Pflanzen übertragene Krankheit Cercospora (Abb. 34a bis 34e). Mehltau variierte zwischen 3,28 und 17,99 % und Cercospora zwischen 0,01 und 0,26 % (Tab. 50 und Tab. 51). In der Duo-Variante 1C2M startete Mehltau in vier von fünf Fällen (80 %) deutlich schwächer als in der Solo-Variante, hier lag die Spannweite der vier Fälle zwischen 0,64 und 5,14 %. Im Versuch Mai_2012 befand sich der Anfangsbefall von Mehltau in der Interaktionsvariante bei 22,16 % (MO_{Duo}) und hatte damit einen höheren Befall als in der Solo-Variante, die mit einem geschätzten Wert von 17,32 % begann. Eine Schätzung des Anfangsbefalls für Cercospora in der Duo-Variante wurde nicht benötigt, da Cercospora als erste Krankheit auf den Pflanzen inokuliert wurde und somit der Anfangsbefall der Solo-Variante auch für die Anpassung der Duo-Variante verwendet werden konnte.

Die Kapazitäten in den Solo-Varianten lagen in den Versuchen Sept_2011_1, Sept_2011_2 und Mrz_2012 auf einem ähnlichen Niveau für beide Krankheiten. Im Versuch Nov_2011 konnte Mehltau deutlich mehr Blätter befallen als Cercospora, wohingegen im Versuch Mai_2012 Cercospora über Mehltau dominierte. Der Vergleich der geschätzten Kapazitäten ergab für Cercospora eindeutig einen Bereich von 76,86 bis 99,07 %. Für Mehltau wurden Werte von 71,12 bis 100 % in der Solo-Variante geschätzt. In der Duo-Variante 1C2M konnte sich Mehltau nicht so stark ausbreiten wie Cercospora. Vergleicht man graphisch die Befallsverläufe, so dominierte Cercospora über Mehltau.

In der Gegenüberstellung der Wachstumsraten erreichte Cercospora bis auf den Versuch Nov_2011 (Abb. 34c) deutlich früher die Kapazität als Mehltau. Cercospora zeigte eine höhere Wachstumsrate als Mehltau. Dies spiegeln auch die Raten für Cercospora wider, die von 0,45 bis 0,78/Tag

variierten. Mehltau, der deutlich langsamer wuchs, hatte geschätzte Wachstumsraten von 0,15 bis 0,50/Tag.

Im Vergleich der absoluten Raten (Faktoren $r_C K_C$ und $r_M K_M$) nahm Cercospora in vier der fünf (80 %) Versuche einen deutlich höheren Wert ein, als dies für Mehltau der Fall war. Für diese Blattkrankheit konnte nur der Versuch Nov_2011 eine höhere absolute Rate vorweisen. Im Mittel aller Versuche hatte Cercospora einen $r_C K_C$ -Wert von 54,50 %/Tag und Mehltau einen $r_M K_M$ -Wert von 26,75 %/Tag.

Der Vergleich der geschätzten Konkurrenzkoefizienten zeigte unterschiedliche Einflüsse der beiden Krankheiten aufeinander. Im Versuch Sept_2011_1 war der Effekt von Mehltau auf Cercospora etwas größer als dies umgekehrt der Fall war, was durch die gemittelten Solo-Varianten hervorgerufen wurde. Im Versuch Nov_2011 konnte, wie schon in der Variante C=M, ein Fall von Förderung durch Mehltaubefall beschrieben werden ($a_{CM} = -0,03$, Nov_2011), der aber nicht signifikant war. Die anderen drei Fälle waren ebenfalls durch einen größeren a_{CM} -Wert gekennzeichnet.

In der Präzision der Modelloptimierung führte der Funktionsparameter Kapazität vor der Wachstumsrate, wobei alle geschätzten Werte signifikant waren. Bei den Konkurrenzkoefizienten war der Einfluss von Cercospora auf Mehltau in allen Fällen signifikant im Gegensatz zum umgekehrten Fall, wo nur zwei der fünf Werte diese Eigenschaft aufwiesen. Der geschätzte Anfangsbefall für Mehltau hatte eine höhere Präzision als die Startwerte für Cercospora, was sich auch in der Signifikanz widerspiegelte.

Vergleicht man das Bestimmtheitsmaß (Tab. 52), so variierte dieses zwischen 0,844 und 0,991. Die Anpassung der beobachteten Daten mit dem modifizierten LV-Modell erfolgte demzufolge mit einer hohen Übereinstimmung. Auch die Residuenquadratsummen, welche zwischen 8,33 und 149,75 lagen, wiesen auf eine gute Abbildung der Daten durch das gewählte Modell hin. Der Vergleich der statistischen Analyse der Modelloptimierung zwischen den Varianten C=M (Tab. 49) und 1C2M (Tab. 52) deutete auf eine bessere Anpassung der Variante C=M durch das modifizierte LV-Modell hin.

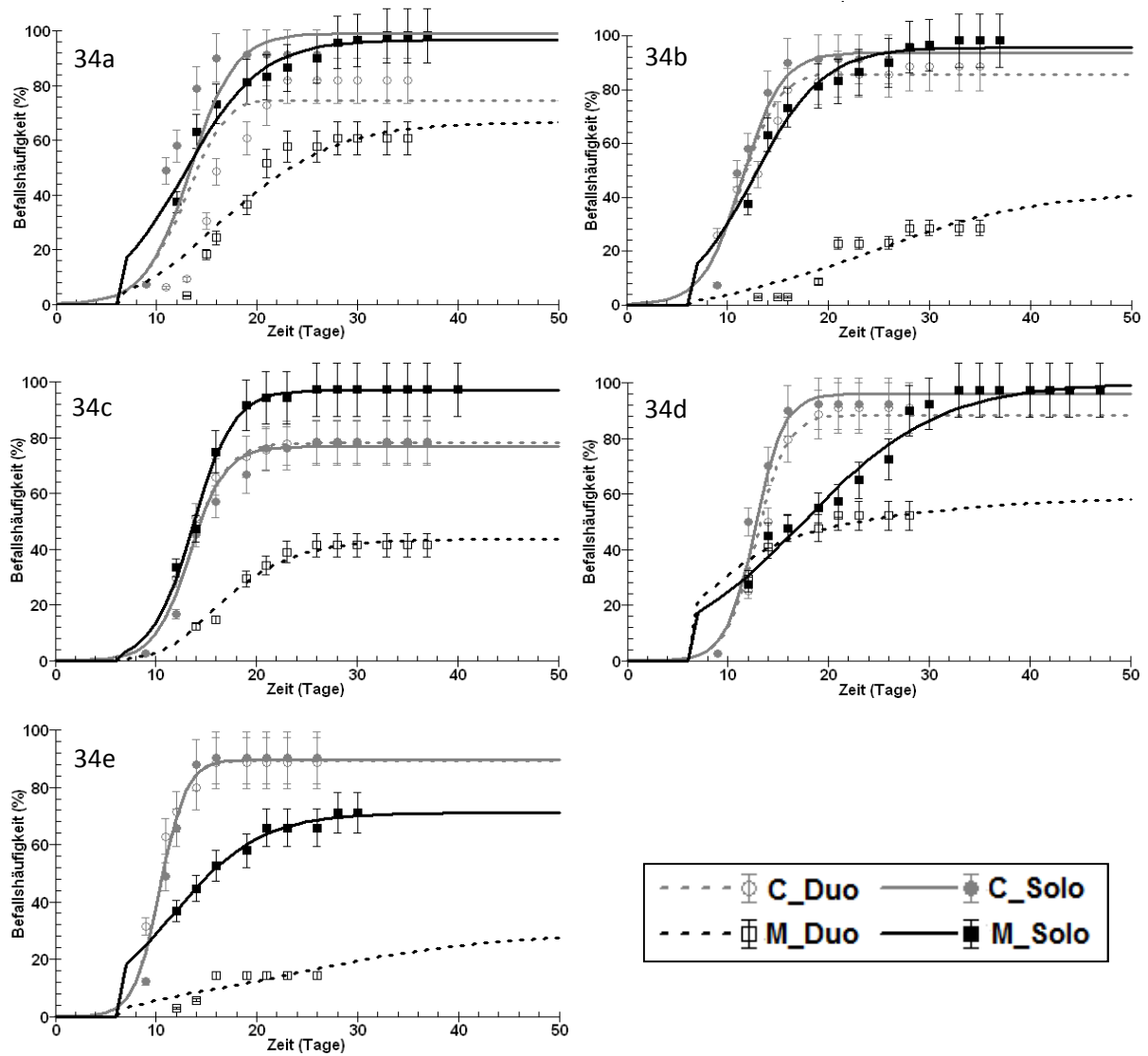


Abb. 34. Die graphische Darstellung des **Interaktionsmodells** auf Basis der **Befallshäufigkeit** für die Versuche Sept_2011_1 (a), Sept_2011_2 (b), Nov_2011 (c), Mrz_2012 (d) und Mai_2012 (e) der Variante **1C2M**.

Tab. 50. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Cercospora**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells der Variante **1C2M** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (-) der Parameter wurde für diese Variante nicht benötigt, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	CO_{Solo} (%) zu t_0	SE	CO_{Duo} (%) zu t_0	SE	K_C (%)	SE	r_C (1/Tag)	SE	α_{CM}	SE		$r_C K_C$ (%/Tag)	
Sept_2011_1	0,23	0,40	-	-	99,07*	7,41	0,45*	0,14	0,56*	0,21		44,58	
Sept_2011_2	0,26	0,20	-	-	93,84*	2,72	0,51*	0,07	0,58	0,28		47,85	
Nov_2011	0,03	0,02	-	-	76,86*	0,99	0,57*	0,05	-0,03	0,04		43,81	
Mrz_2012	0,01	0,02	-	-	96,07*	2,42	0,69*	0,11	0,16*	0,06		66,29	
Mai_2012	0,03	0,03	-	-	89,69*	1,74	0,78*	0,09	0,02	0,20		69,96	
$\bar{x}$ (SD)	0,11	(0,12)	-	-	91,11	(8,67)	0,60	(0,13)	0,26	(0,29)		54,50	(12,60)

Tab. 51. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Mehltau**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells der Variante **1C2M** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	MO_{Solo} (%) zu t_7	SE	MO_{Duo} (%) zu t_7	SE	K_M (%)	SE	r_M (1/Tag)	SE	α_{MC}	SE		$r_M K_M$ (%/Tag)	
Sept_2011_1	16,93	11,14	5,14	4,09	96,74*	5,50	0,27*	0,10	0,40*	0,11		26,12	
Sept_2011_2	15,17*	5,74	1,72	0,81	95,65*	2,40	0,29*	0,06	0,63*	0,07		27,74	
Nov_2011	3,28*	1,01	0,64*	0,24	97,05*	0,99	0,50*	0,04	0,68*	0,02		48,53	
Mrz_2012	17,32*	3,33	22,16*	3,02	100,0*	3,22	0,15*	0,02	0,47*	0,07		15,00	
Mai_2012	17,99*	6,57	3,09	1,48	71,12*	3,63	0,23*	0,07	0,46*	0,12		16,36	
$\bar{x}$ (SD)	14,14	(6,16)	6,55	(8,89)	92,11	(11,84)	0,29	(0,13)	0,53	(0,17)		26,75	(13,43)

Tab. 52. Das **Ergebnis der statistischen Analyse** der Modelloptimierung für die Variante **1C2M** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: R^2 = Bestimmtheitsmaß, WSS = Weighted sum of square, MSM = Model mean square, MSR = Residual mean square

Versuch	R^2	residual WSS	total WSS	MSM	MSR
Sept_2011_1	0,8447	5241,26	33747,99	3563,34	149,75
Sept_2011_2	0,9777	1036,44	46485,11	5681,08	28,79
Nov_2011	0,9908	341,55	37298,97	4619,68	8,33
Mrz_2012	0,9678	845,17	26275,45	3178,79	27,26
Mai_2012	0,9863	423,44	3091,8	3809,8	16,94

4.4.1.3 Das Interaktionsmodell für die Variante 1M2C

Insgesamt konnten auch für die Variante 1M2C fünf Interaktionsversuche durchgeführt werden (Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012). Aufgrund der Reihenfolge der Inokulationen trat Mehltau in der Variante 1M2C als erste Krankheit im Versuch auf. Dies wurde durch den graphischen Vergleich der fünf Versuche (Abb. 35a bis e), insbesondere bei der Betrachtung der Solo-Variante für Mehltau, deutlich. Die Befallsverläufe der beiden Krankheiten in der Duo-Variante sowie von Solo C wurden ab dem Zeitpunkt $t = 7$ simuliert. Für Mehltau wurde dieser Startzeitpunkt in der Kombinationsvariante gewählt, da eine valide Parameteroptimierung ab $t = 0$, unter Berücksichtigung des Befallsrückgangs, hervorgerufen durch die Sekundärinokulation mit Cercospora, nicht möglich war.

Cercospora begann mit dem Aufbau der Epidemie verzögert im Vergleich zu Mehltau. Dies wurde auch durch die geschätzten Werte des Anfangsbefalls der Solo- und Duo-Varianten widerspiegelt (Tab. 53 und 54).

Vergleicht man die Kapazitäten für Mehltau in der Solo-Variante, so lagen diese alle auf einem Niveau in der Spannweite von 97,14 bis 100 %. Cercospora hatte, betrachtet als einzelne Krankheit auf der Pflanze, ein etwas niedrigeres Niveau als Mehltau. Die geringste Kapazität war 75,21 %, die höchste Kapazität 92,55 %. Als einzelne Blattkrankheit war somit Mehltau deutlich stärker im Versuch vertreten als Cercospora. In der Duo-Variante sah die Verteilung anders aus. Trotz höherem Anfangsbefall für Mehltau erreichte Cercospora in vier der fünf Fälle (80 %) eine deutlich höhere Endbefallshäufigkeit, was in der graphischen Darstellung zu erkennen ist (Abb. 35a bis 35d). In einem Fall konnte Mehltau jedoch an die Befallssituation der Solo-Variante anknüpfen und erreichte ähnlich hohe Befallshäufigkeiten (Abb. 35e).

Bei Betrachtung der Wachstumsraten zeigte sich für Cercospora ein deutlich schnelleres Wachstum als für Mehltau. In allen Versuchen erreichte die Krankheit höhere Raten als der Interaktionspartner. Die Rate variierte zwischen 0,48 und 0,97/Tag für Cercospora und zwischen 0,14 und 0,90/Tag für Mehltau.

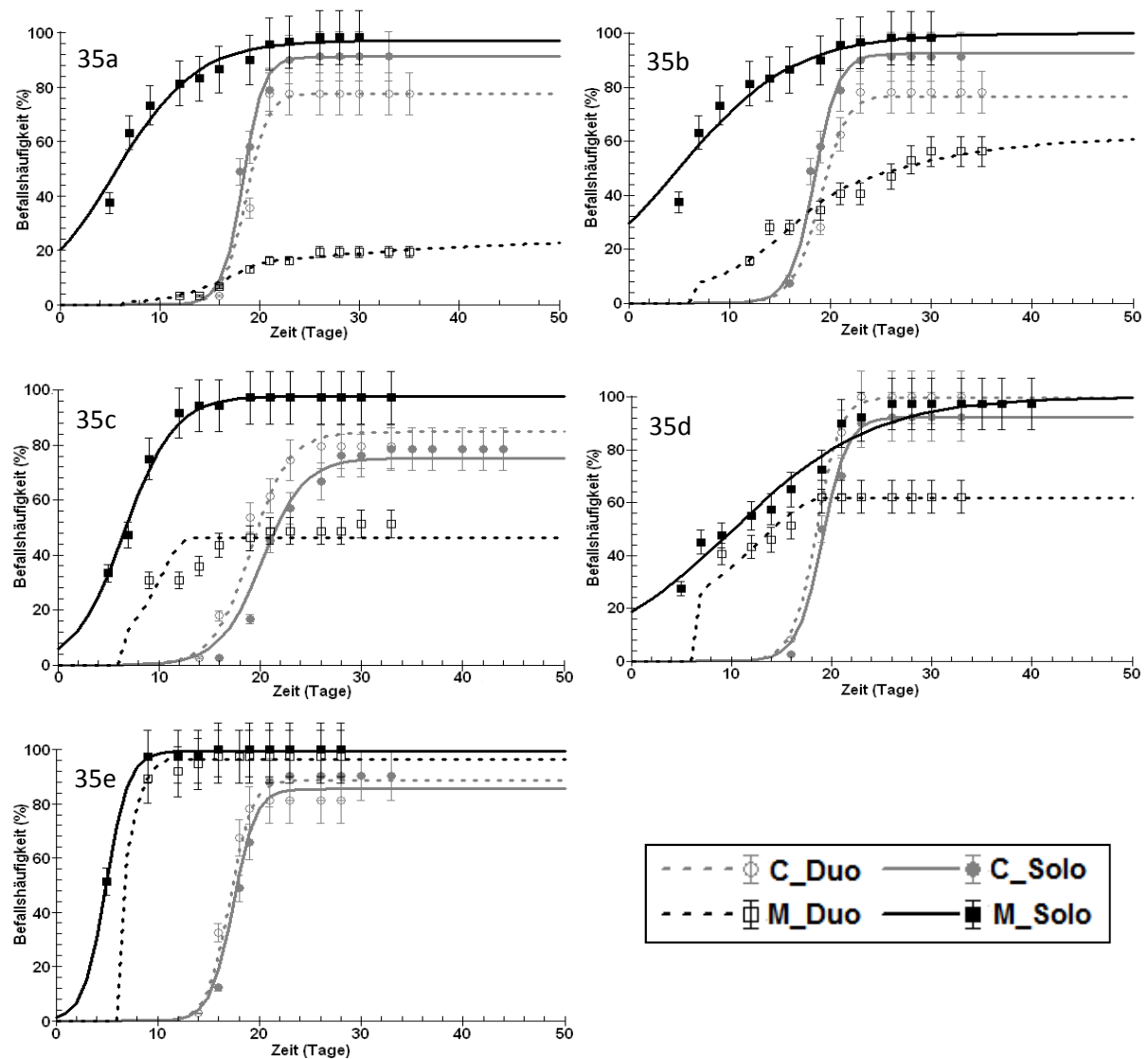


Abb. 35 Die graphische Darstellung des **Interaktionsmodells** auf Basis der **Befallshäufigkeit** für die Versuche Sept_2011_1 (a), Sept_2011_2 (b), Nov_2011 (c), Mrz_2012 (d) und Mai_2012 (e) der Variante **1M2C**.

Führte man Kapazität und Wachstumsrate zusammen, so erzielte Mehltau in allen Fällen eine geringere absolute Rate als Cercospora. Die $r_M K_M$ -Werte lagen im Bereich von 14,00 bis 89,50 %/Tag und für $r_C K_C$ errechneten sich Werte zwischen 36,10 und 88,43 %/Tag.

Vergleicht man die Konkurrenzkoeffizienten, so zeigte sich deutlich die Dominanz von Cercospora über Mehltau in der Interaktionsvariante 1M2C. In allen fünf Versuchen war der Koeffizient α_{MC} „Einfluss Cercospora auf Mehltau“ höher als der Koeffizient α_{CM} „Einfluss Mehltau auf Cercospora“. In drei der fünf Fälle wurde sogar ein negativer Wert für α_{CM} berechnet, von denen nur zwei signifikant waren. Wie schon in der Variante C=M konnte somit ein Förderungseffekt festgestellt werden. Keine Signifikanz des Konkurrenzkoeffizienten lag für die Versuche Nov_2011, Mrz_2012 (jeweils α_{MC}) und Mai_2012 (α_{MC} und α_{CM}) vor.

Tab. 53. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Cercospora**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells der Variante **1M2C** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (-) der Parameter wurde für diese Variante nicht benötigt, (*) geschätzter Parameter ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	CO_{Solo} (%) zu t_7	SE	CO_{Duo} (%) zu t_7	SE	K_C (%)	SE	r_C (1/Tag)	SE	α_{CM}	SE		$r_C K_C$ (%/Tag)	
Sept_2011_1	0,002	0,003	-	-	91,17*	1,667	0,97*	0,146	0,79*	0,14		88,43	
Sept_2011_2	0,007	0,01	-	-	92,55*	1,902	0,83*	0,120	0,32*	0,046		76,82	
Nov_2011	0,14	0,126	-	-	75,21*	1,64	0,48*	0,066	-0,21*	0,044		36,10	
Mrz_2012	0,006	0,007	-	-	92,38*	1,548	0,80*	0,100	-0,12*	0,026		73,90	
Mai_2012	0,006	0,008	-	-	85,47*	1,62	0,91*	0,120	-0,03	0,015		77,78	
$\bar{x}$ (SD)	0,03	(0,06)			87,36	(7,38)	0,80	(0,19)	0,15	(0,41)		70,61	(20,06)

Tab. 54. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Mehltau**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells der Variante **1M2C** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (*) geschätzter Parameter ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	MO_{Solo} (%) zu t_0	SE	MO_{Duo} (%) zu t_7	SE	K_M (%)	SE	r_M (1/Tag)	SE	α_{MC}	SE		$r_M K_M$ (%/Tag)	
Sept_2011_1	19,88*	4,401	1,02*	0,425	97,14*	1,984	0,25*	0,036	0,94*	0,079		24,29	
Sept_2011_2	29,29*	4,489	7,41*	1,881	100,00*	2,818	0,18	0,26	0,50*	0,056		18,00	
Nov_2011	6,00	2,86	12,62*	3,367	97,81*	1,91	0,41*	0,07	16,62	10,83		40,10	
Mrz_2012	18,68*	2,62	26,46*	2,28	100,00*	2,536	0,14*	0,015	0,57	0,265		14,00	
Mai_2012	1,19	3,185	60,44	27,193	99,44*	1,64	0,90	0,537	9,83	17,48		89,50	
$\bar{x}$ (SD)	15,01	(11,33)	21,59	(23,65)	98,88	(1,32)	0,38	(0,31)	5,69	(7,29)		37,18	(30,89)

Tab. 55. Das **Ergebnis der statistischen Analyse** der Modelloptimierung für die Variante **1M2C** auf Basis der **Befallshäufigkeit**. Abk.: R^2 = Bestimmtheitsmaß, WSS = Weighted sum of square, MSM = Model mean square, MSR = Residual mean square

Versuch	R^2	residual WSS	total WSS	MSM	MSR
Sept_2011_1	0,9894	507,66	47847,60	5917,49	15,86
Sept_2011_2	0,9774	644,14	28486,78	3480,33	20,13
Nov_2011	0,9680	1012,50	31766,44	3844,24	27,36
Mrz_2012	0,9801	564,56	28384,67	3477,51	16,60
Mai_2012	0,9724	581,20	21090,64	2563,68	20,76

Das Bestimmtheitsmaß lag zwischen 0,9680 und 0,9894 und zeigte an, dass die Daten unter Verwendung des modifizierten LV-Modells gut erklärt werden konnten. Die Residualquadratsummen (MSR) hatten Werte zwischen 15,86 und 27,36. Für diese statistische Größe wies die Variante 1M2C im Vergleich zu C=M und 1C2M die geringste Streuung zwischen den einzelnen Versuchen auf.

4.4.1.4 Der statistische Vergleich der Varianten und Versuchsdurchgänge in den Interaktionsvarianten anhand der Befallshäufigkeit

Um herauszufinden, ob es signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Interaktionsvarianten (C=M, 1C2M und 1M2C) und zwischen den fünf Versuchsdurchgängen (Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012) gab, wurde eine Varianz-Analyse (Tukey-Test, $p = 0,05$), separat für jede Blattkrankheit, durchgeführt.

Vergleicht man die drei geschätzten Funktionsparameter, die die Krankheiten innerhalb der Interaktion beschreiben (CO_{Solo} , r_C , a_{CM}) sowie den berechneten Faktor $r_C K_C$ für Cercospora, so konnten zwischen den drei Kombinationen keine Unterschiede festgestellt werden (Tab. 56).

Ein ähnliches Bild zeigte sich für Mehltau. Auch für diese zweite Krankheit waren die geschätzten Parameter aller Interaktionsvarianten gleich (Tab. 57). Die Entwicklung der Epidemie und die Interaktion der Krankheiten waren somit unabhängig vom jeweiligen Inokulationszeitpunkt bzw. Startpunkt der Modellierung der Krankheit.

Die Ergebnisse für die Varianz-Analyse der fünf Versuchsdurchgänge zeigten für den Parameter a_{CM} und für den Faktor $r_C K_C$ signifikante Unterschiede auf (Tab. 58). Bei der Betrachtung der Konkurrenzkoefizienten α_{CM} waren der Versuch Nov_2012 und Mai_2012 signifikant verschieden zu den beiden Durchgängen im September, und der Versuch Sept_2011_1 unterschied sich signifikant vom Versuch Mrz_2012. Ursächlich für die Abweichungen zwischen den September-Versuchen und den anderen Untersuchungsreihen könnte die Verwendung der gemittelten Solo-Varianten für die ersten Prüfglieder im September sein, da zu diesem Zeitpunkt noch keine eigenen Einzeluntersuchungen parallel zu den Duo-Varianten angelegt wurden (vergleiche Abschnitt 3.2.2.1).

Für die absolute Rate $r_C K_C$ konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem Versuch Nov_2011 und dem Versuch Mai_2012 festgestellt werden.

Tab. 56. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Cercospora** auf Basis der **Befallshäufigkeit** in den drei Interaktionsvarianten **C=M, 1C2M und 1M2C**. Die Tabelle der Mittelwerte muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag)

Variante	Startpunkt Modellierung	$CO_{Solo}(\%)$	$r_C(1/Tag)$	α_{CM}	$r_C K_C(\%/Tag)$
C=M (n = 5)	t_0	0,06a	0,64a	0,35a	56,77a
1C2M (n = 5)	t_0	0,11a	0,60a	0,26a	54,50a
1M2C (n = 5)	t_7	0,01a	0,80a	0,15a	70,61a

Tab. 57. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Mehltau** auf Basis der **Befallshäufigkeit** in den drei Interaktionsvarianten **C=M, 1C2M und 1M2C**. Die Tabelle der Mittelwerte muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag)

Variante	Startpunkt der Modellierung (Solo)	$MO_{Solo}(\%)$	Startpunkt der Modellierung (Duo)	$MO_{Duo}(\%)$	$r_M(1/Tag)$	α_{MC}	$r_M K_M(\%/Tag)$
C=M (n = 5)	t_0	15,22a	t_0	0,98a	0,31a	0,58a	29,20a
1C2M (n = 5)	t_7	14,14a	t_7	6,55a	0,29a	0,53a	26,75a
1M2C (n = 5)	t_0	15,01a	t_7	21,59a	0,38a	5,69a	37,18a

Tab. 58. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Cercospora** auf Basis der **Befallshäufigkeit** in den fünf Versuchsdurchgängen **Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012**. Die Tabelle der Mittelwerte muss spaltenweise gelesen werden. Werte die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag)

Variante	$CO_{Solo}(\%)$	$r_C(1/Tag)$	α_{CM}	$r_C K_C(\%/Tag)$
Sept_2011_1 (n = 3)	0,10a	0,68a	0,83a	64,14ab
Sept_2011_2 (n = 3)	0,10a	0,65a	0,63ab	61,87ab
Nov_2011 (n = 4)	0,09a	0,51a	-0,16c	39,15b
Mrz_2012 (n = 2)	0,01a	0,75a	0,02bc	70,10ab
Mai_2012 (n = 3)	0,01a	0,88a	-0,002c	78,19a

Tab. 59. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Mehltau** auf Basis der **Befallshäufigkeit** in den fünf Versuchsdurchgängen **Sept_2011_1**, **Sept_2011_2**, **Nov_2011**, **Mrz_2012** und **Mai_2012**. Die Tabelle muss spaltenweise gelesen werden. Werte die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag)

Variante	$MO_{Solo}(\%)$	$MO_{Duo}(\%)$	$r_M(1/Tag)$	α_{MC}	$r_M K_M(\%Tag)$
Sept_2011_1 (n = 3)	21,82ab	1,94a	0,23a	0,60a	22,80a
Sept_2011_2 (n = 3)	26,06a	3,00a	0,21a	0,57a	20,25a
Nov_2011 (n = 4)	4,78cb	2,53a	0,45a	4,69a	43,63a
Mrz_2012 (n = 2)	18,00abc	24,58a	0,15a	0,52a	14,50a
Mai_2012 (n = 3)	7,69bc	20,51a	0,49a	3,57a	44,33a

Der Vergleich der fünf Versuchsdurchgänge für Mehltau zeigte, dass die geschätzten Funktionsparameter bis auf den Anfangsbefall MO_{Solo} statistisch betrachtete alle gleich waren (Tab. 59). Die Epidemie von Solo M startete hingegen im Versuch Nov_2011 und Mai_2012 mit einer signifikant geringeren Befallshäufigkeit (4,78 und 7,69 %), als dies im Versuch Sept_2011_2 (26,06 %) der Fall war.

4.4.1.5 Der statistische Vergleich zwischen Cercospora und Mehltau in den Interaktionsvarianten anhand der Befallshäufigkeit

Vergleicht man die beiden Krankheiten Cercospora und Mehltau in der Interaktion miteinander, so zeigten sich über alle betrachteten Parameter signifikante Unterschiede (Tab. 60). Mehltau startete in der Solo-Variante mit deutlich höheren Befallsstärken (14,79 %) als Cercospora (0,07 %). Auch in der Kapazität der Solo-Variante erreichte Mehltau eine höhere mittlere Befallshäufigkeit (vergleiche 95,33 zu 88,79 %). Das erzielte Niveau zum Ende der Epidemie wies jedoch eine geringere Differenz zwischen den beiden Krankheiten auf, wie dies zu Beginn des Krankheitsauftretens der Fall war (Differenz der Anfangsbefallswerte: 14,72 % zu Differenz der Kapazitäten: 6,54 %). Bei Betrachtung der Wachstumsraten hingegen hatte Cercospora ein signifikant schnelleres Wachstum als Mehltau. Die Krankheit, die zum Start noch im Nachteil war, ist in der Rate im Mittel aller Interaktionsvarianten fast doppelt so schnell wie Mehltau. Dies kam auch beim Vergleich der absoluten Rate zum Tragen. Dieser Wert nahm bei Mehltau im Mittel 31,04 %/Tag an und für Cercospora 60,63 %/Tag, was ebenfalls zu einem signifikanten Unterschied in der Varianz-Analyse führte.

Der Vergleich der Konkurrenzkoeffizienten für die drei Varianten ergab (Tab. 61), dass sich in den Varianten C=M (0,58) und 1C2M (0,53) der Einfluss von Cercospora auf Mehltau signifikant von Null unterschied und somit ein negativer Effekt von Cercospora auf Mehltau in der Interaktion bestätigt

wurde. In der Variante 1M2C konnte trotz hohem Konkurrenzkoeffizienten für α_{MC} (5,69) kein signifikanter Unterschied zu Null festgestellt werden. Ein Grund hierfür lag in der hohen Streuung der Daten, die Werte von 0,50 bis 16,62 beinhaltete (Tab. 54).

Verglich man die Konkurrenzkoeffizienten, gemittelt über alle Varianten (Tab. 60), mit einem Interaktionskoeffizienten, der den Wert Null hatte ($\alpha = 0$ heißt keine Konkurrenz), so zeigte sich nur ein Effekt von „Cercospora auf Mehltau“ und nicht umgekehrt. Der Einfluss der beiden Krankheiten war somit einseitig ausgeprägt und es konnte nur in dieser Situation von einer negativen Interaktion auf Mehltau mit Vorteilen für Cercospora gesprochen werden.

Tab. 60. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Cercospora** und **Mehltau** über **alle Versuche** und **alle Interaktionsvarianten**. Als Datenbasis diente die **Befallshäufigkeit**. Die Tabelle muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Für den Konkurrenzkoeffizienten wurde ausschließlich geprüft, ob ein signifikanter Unterschied zu Null vorhanden ist. Werte mit einem (*) unterscheiden sich signifikant zu Null.

Abk.: yO_{Solo} und yO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), K = Kapazität (%), r = Wachstumsrate (1/Tag), α = Konkurrenzkoeffizient, rK = Produkt aus r und K (%/Tag), x = Vergleich des Funktionsparameters wegen Unvollständigkeit nicht möglich.

Krankheit	$yO_{Solo}(\%)$	$yO_{Duo}(\%)$	$K(\%)$	$r(1/\text{Tag})$	α	$rK(\%/ \text{Tag})$
Cercospora (n = 15)	0,07b	x	88,79b	0,68a	0,25	60,63a
Mehltau (n = 15)	14,79a	x	95,33a	0,32b	2,27*	31,04b

Tab. 61. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Konkurrenzkoeffizienten für **Cercospora** und **Mehltau** über alle Versuche und für die drei Interaktionsvarianten **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Als Datenbasis diente die **Befallshäufigkeit**. Die Tabelle muss zeilenweise gelesen werden. Werte, mit einen (*) unterscheiden sich signifikant zu Null.

Abk.: α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau

Variante	α_{MC}	α_{CM}
C=M (n = 5)	0,58*	0,35
1C2M (n = 5)	0,53*	0,26
1M2C (n = 5)	5,69	0,15

4.4.2 Die Interaktionsmodelle auf Basis der Befallsstärke

4.4.2.1 Das Interaktionsmodell für die Variante C=M

Wie schon im Fall der Befallshäufigkeiten konnten insgesamt fünf verschiedene Interaktionsversuche der Variante C=M mit dem modifizierten LV-Modell (Gleichung 20 bis 23) beschrieben werden (Sept_2011_1, Sept_2011_2, Nov_2011_1, Nov_2011_2 und Mai_2012). Für die Versuche Sept_2011_1 und Sept_2011_2 muss bei der Interpretation der Ergebnisse, die Verwendung von gemittelten Befallsdaten für die Solo-Varianten C und M berücksichtigt werden.

Die graphische Gegenüberstellung der fünf Versuchsdurchgänge zeigt auf (Abb. 36a bis e), dass der Befallsverlauf von Solo M im Versuch Mai_2012 unterdurchschnittlich im Vergleich zu den restlichen vier Durchgängen verlief. Ursächliche war hierfür möglicherweise eine zu geringe Inokulummenge.

Bei Betrachtung der Anfangsbefallswerte der beiden Blattkrankheiten (Tab. 62 und 63) begann Mehltau in den meisten Fällen mit einem deutlich höheren Anfangsbefall als Cercospora, insbesondere in der Solo-Variante. Bei Mehltau variierte der Wert in der Solo-Variante zwischen 0,24 und 1,96 %. In der Duo-Variante nahm der Anfangsbefall Werte zwischen 0,001 und 0,95 % an. Bei Cercospora lag der Wert zwischen 0,006 und 0,01 %.

Der Vergleich der maximal erreichten Befallsstärken für beide Krankheiten in den Solo- und Duo-Versuchen zeigte in der graphischen Darstellung der Optimierungsergebnisse (Abb. 36a bis e), dass Mehltau in der Variante ohne Interaktionspartner in drei Fällen eine geringere Kapazität erreichte als Cercospora, wobei die Unterschiede besonders deutlich im Mai-Versuch (Abb. 36e), mit einer Differenz von 59,94 % im Endbefallsniveau, waren. In den beiden Versuchsdurchgängen im November (Abb. 36c und d) lag die umgekehrte Situation vor, Mehltau erreichte eine höhere maximale Befallsstärke als Cercospora. In der Duo-Variante zeigte sich für alle Versuchsdurchgänge eine klare Dominanz von Cercospora über Mehltau in der erreichten Endbefallsstärke.

Mehltau lag über den gesamten Beobachtungszeitraum auf einem sehr niedrigen Befallsniveau unterhalb der Befallsstärke, welche in der Solo-Variante erlangt wurde. Cercospora hingegen erzielte unterschiedliche Endbefallsstärken im Verhältnis zu der Situation ohne Interaktionspartner. In den September-Versuchen sowie im Mai-Versuch lag die maximale Befallsstärke unterhalb der Solo-Variante (Abb. 36a, b und e), wobei die Differenz in der Versuchsreihe im Mai deutlich kleiner war als in den September-Versuchen. In den Durchgängen im November erreichte Cercospora höhere Befallsstärken in der Duo-Variante als in der Solo-Variante (Abb. 36c und d).

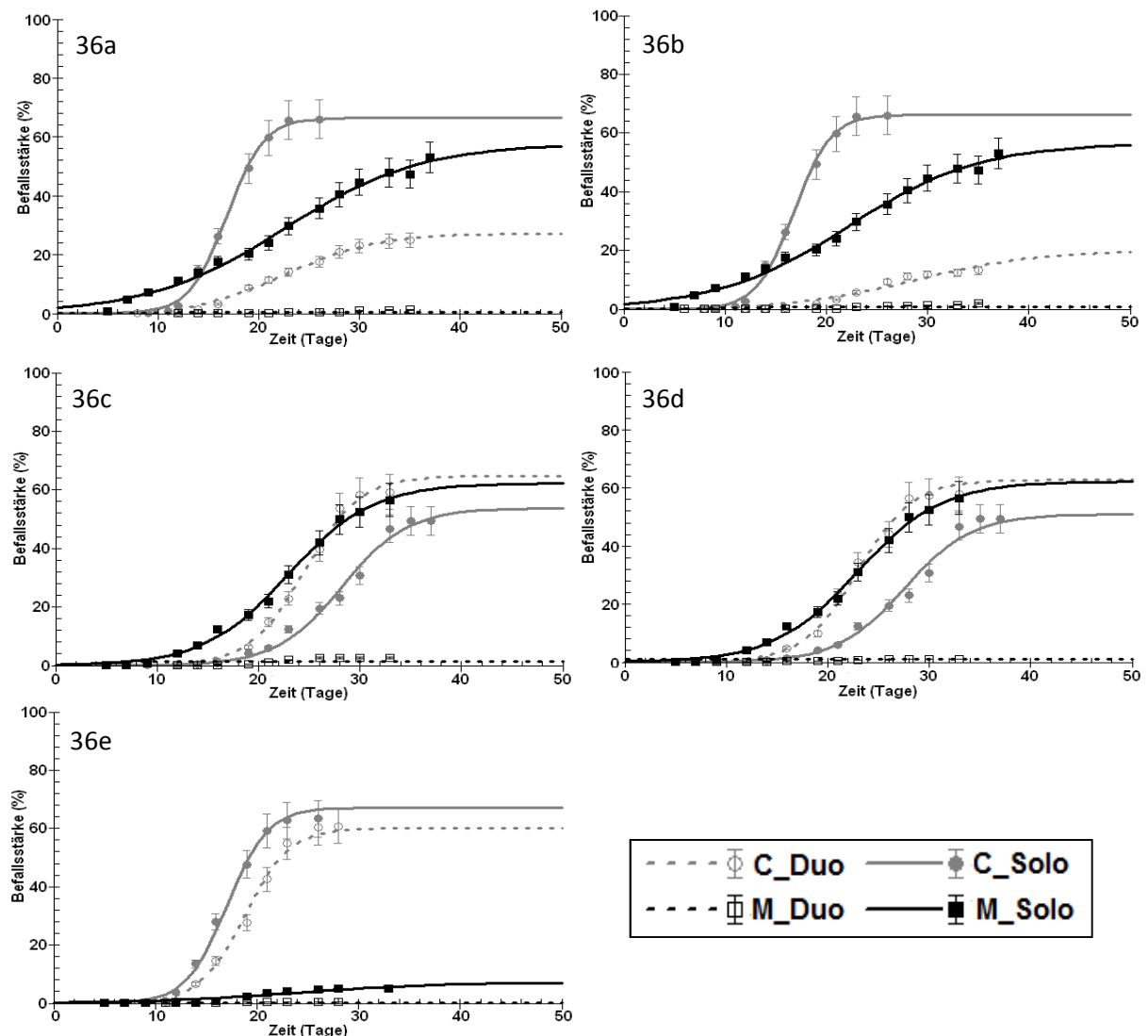


Abb. 36. Die **graphische Darstellung des Interaktionsmodells** auf Basis der **Befallsstärke** für die Versuche Sept_2011_1 (a), Sept_2011_2 (b), Nov_2011_1 (c), Nov_2011_2 (d) und Mai_2012 (e) der Variante **C=M**.

Stellt man die Wachstumsraten gegenüber, so zeigte sich in allen fünf Versuchen ein schnelleres Wachstum von Cercospora. Die maximale Rate lag für Cercospora bei 0,56/Tag und die geringste bei 0,30/Tag. Bei Mehltau wurden Raten zwischen 0,14 und 0,24/Tag erzielt. Die Verknüpfung von Rate und Kapazität ergab ($r_C K_C$ und $r_M K_M$), dass Cercospora in allen untersuchten Fällen eine höhere absolute Rate als Mehltau hatte. Die Spannweite lag zwischen 16,66 und 37,10 %/Tag für Cercospora und zwischen 1,01 und 14,94 %/Tag für Mehltau.

Der Konkurrenzkoefizient, der den Einfluss der Interaktionspartner aufeinander beschreibt, zeigte in der Vergleichsanalyse ein sehr kontroverses Bild. Lag der Wertebereich bei Verwendung der Befallshäufigkeit als Berechnungsgrundlage noch zwischen $-0,24$ und $1,15$ für a_{CM} und zwischen $0,42$ und $0,85$ für a_{MC} , so wurden auf Basis der Befallsstärke Koeffizienten zwischen $-7,60$ und $6965,58$ für a_{CM} und zwischen $6,58$ und $2377,06$ für a_{MC} geschätzt. Eine Auswertung war aufgrund der extrem

hohen Streuung nicht möglich. Die Signifikanz des Faktors, der die Beziehung der beiden Blattkrankheiten beschreibt, war nur bei zwei von zehn Werten gegeben, was im Kontrast zu den Kapazitäten und Wachstumsraten stand, bei denen 95 % der Schätzungen eine Signifikanz aufwiesen. Bezüglich der Signifikanz waren die geschätzten Werte des Anfangsbefalls sehr unterschiedlich. Drei Fälle waren für den Anfangsbefall von Solo M signifikant. Bei *Cercospora* betraf dies nur einen Werte und bei Duo M keinen einzigen.

Die Optimierungsstatistik zeigte für alle betrachteten Fälle ein hohes Bestimmtheitsmaß und geringe Residuenquadratsummen an (Tab. 64). Dies bedeutete, dass eine hohe Übereinstimmung zwischen Daten und dem gewählten modifizierten LV-Modell herrschte. Das insgesamt geringe Befallsniveau von Mehltau, die hohen Werte der Konkurrenzcoeffizienten sowie die Streuung zwischen den einzelnen Versuchen ließen diese statistische Bewertung der Modelloptimierung jedoch kritisch betrachten.

Tab. 62. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Cercospora**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die Variante **C=M** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (-) der Parameter wurde für diese Variante nicht benötigt, (#) Wert als fester Parameter während der Optimierung fixiert, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	$CO_{Solo}(\%)$ zu t_0	SE	$CO_{Duo}(\%)$ zu t_0	SE	$K_C(\%)$	SE	$r_C(1/Tag)$	SE	α_{CM}	SE		$r_C K_C(\%/Tag)$	
Sept_2011_1	0,007*	0,003	-	-	66,50*	0,972	0,54*	0,029	75,57	58,443		35,91	
Sept_2011_2	0,006	0,003	-	-	66,25*	1,066	0,56*	0,036	67,12	39,932		37,10	
Nov_2011_1	0,009	0,005	-	-	53,74*	1,62	0,31*	0,021	-7,60*	2,931		16,66	
Nov_2011_2	0,01	0,01	-	-	50,96*	1,61	0,30*	0,022	-11,01	5,69		15,29	
Mai_2012	0,01	0,005	-	-	67,12*	1,18	0,50*	0,026	6965,58	291076		33,56	
$\bar{x}$ (SD)	0,01	(0,002)			60,91	(7,89)	0,44	(0,13)	1417,93	(3101,49)		27,70	(10,79)

Tab. 63. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Mehltau**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die Variante **C=M** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (#) Wert als fester Parameter während der Optimierung fixiert, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	$MO_{Solo}(\%)$ zu t_0	SE	$MO_{Duo}(\%)$ zu t_0	SE	$K_M(\%)$	SE	$r_M(1/Tag)$	SE	α_{MC}	SE		$r_M K_M(\%/Tag)$	
Sept_2011_1	1,96*	0,296	0,06	0,044	57,81*	2,027	0,15*	0,009	6,58*	1,448		8,67	
Sept_2011_2	1,76*	0,296	0,09	0,055	56,61*	1,964	0,15*	0,010	19,93	10,63		8,49	
Nov_2011_1	0,25*	0,096	0,30	0,364	62,24*	2,652	0,24*	0,019	269,21	478,65		14,94	
Nov_2011_2	0,24	0,11	0,95	2,393	62,20*	2,947	0,24*	0,020	2377,06	74050,6		14,93	
Mai_2012	0,25#		0,001#		7,18	3,63	0,14*	0,030	489,81	509889		1,01	
$\bar{x}$ (SD)	0,89	(0,89)	0,28	(0,39)	49,21	(23,63)	0,18	(0,05)	632,52	(995,35)		9,61	(5,76)

Tab. 64. Das **Ergebnis der statistischen Analyse** der Modelloptimierung für die Variante **C=M** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: R^2 = Bestimmtheitsmaß, WSS = Weighted sum of square, MSM = Model mean square, MSR = Residual mean square

Versuch	R^2	residual WSS	total WSS	MSM	MSR
Sept_2011_1	0,9966	62,54	18668,30	2325,72	1,60
Sept_2011_2	0,9961	77,88	19782,31	2463,06	1,85
Nov_2011_1	0,9946	103,81	19176,31	2384,06	2,81
Nov_2011_2	0,9933	135,90	20363,76	2528,48	3,48
Mai_2012	0,9960	76,20	20069,96	3332,29	2,17

4.4.2.2 Das Interaktionsmodell für die Variante 1C2M

Auch bei der Variante 1C2M konnten fünf unterschiedliche Versuche auf Basis der Befallsstärke mit dem modifizierten LV-Modell modelliert werden.

Vergleicht man den Anfangsbefall in der Solo-Variante für beide Krankheiten, so wurden für Mehltau erneut deutlich höhere Befallswerte als für Cercospora geschätzt (Tab. 65 und 66). Die Startwerte variierten zwischen 0,004 und 1,94 % für Mehltau und zwischen 0,006 und 0,13 % für Cercospora. In der Duo-Variante wurden aufgrund des Modellaufbaus nur Anfangsbefallswerte für Mehltau geschätzt. Hier lagen Werte zwischen 0,12 und 1,71 % vor. Der Anfangsbefall von Mehltau in der Duo-Variante war somit in der Variante 1C2M höher als in der Variante C=M (vergleiche Tab. 63 und 66). Auch in diesem Fall konnte ein Zusammenhang zwischen niedrigem Startwert und hoher Rate festgestellt werden.

Der graphische Vergleich zwischen den Interaktionsmodellen der Varianten C=M und 1C2M legte wiederholt offen, dass im Versuch Mai_2012 die Solo M Variante in ihrem geringen Befallsverlauf nicht mit den Krankheitsentwicklungen der anderen vier Versuchsdurchgänge mithalten konnte (Abb. 36e und 37e). Grund hierfür war möglicherweise erneut die geringe Inokulumkonzentration des Mehltaus. Die Gegenüberstellung der Kapazitäten der Solo-Varianten für Cercospora und Mehltau zeigte, mit einer Differenz der beiden Krankheiten von 48,71 % zum Vorteil für Cercospora (Mai_2012), die enorme Diskrepanz zwischen den beiden Blattkrankheiten auf.

Die Dominanz von Cercospora spiegelte sich auch in den anderen vier Versuchen mit einem deutlichen höheren Befallsniveau für den perthotrophen Pilz wider. Die maximale Befallsstärke in der Duo-Variante war gekennzeichnet durch ein sehr niedriges Befallsniveau von Mehltau, welches in allen Versuchsdurchgängen vorhanden war (Abb. 37a bis e). Bei Cercospora kam es erneut zu drei verschiedenen Situationen. In zwei der fünf Fälle (Abb. 37a und b) erreichte die Blattkrankheit nicht das Befallsstärkeniveau, welches in der Solo-Variante erlangt wurde. Die Interaktion nahm demzufolge negativen Einfluss auf die Entwicklung der Befallsstärke. Im November- und Mai-Versuch (Abb. 37c und 37e) lag der umgekehrte Fall vor, Cercospora schnitt in der Interaktionsvariante besser ab als in der Solo-Variante und im März-Versuch lagen beide Befallskurven gleich auf, womit kein

Einfluss der Interaktion auf *Cercospora* festgestellt werden konnte (Abb. 37d). Der Vergleich der Wachstumsraten der beiden Blattkrankheiten zeigte, dass sich *Cercospora* schneller ausbreitete als Mehltau. Die Raten lagen zwischen 0,32 und 0,59/Tag für *Cercospora* und zwischen 0,15 und 0,40/Tag für Mehltau. Aus dem Produkt von Kapazität und Rate ergaben sich die absoluten Raten, die, wie schon bei der Kapazität und der Wachstumsrate in der Einzelbetrachtung, die Dominanz von *Cercospora* über Mehltau bestätigten. Die Werte variierten zwischen 15,96 und 38,22 %/Tag für *Cercospora* und zwischen 3,43 und 14,94 %/Tag für Mehltau.

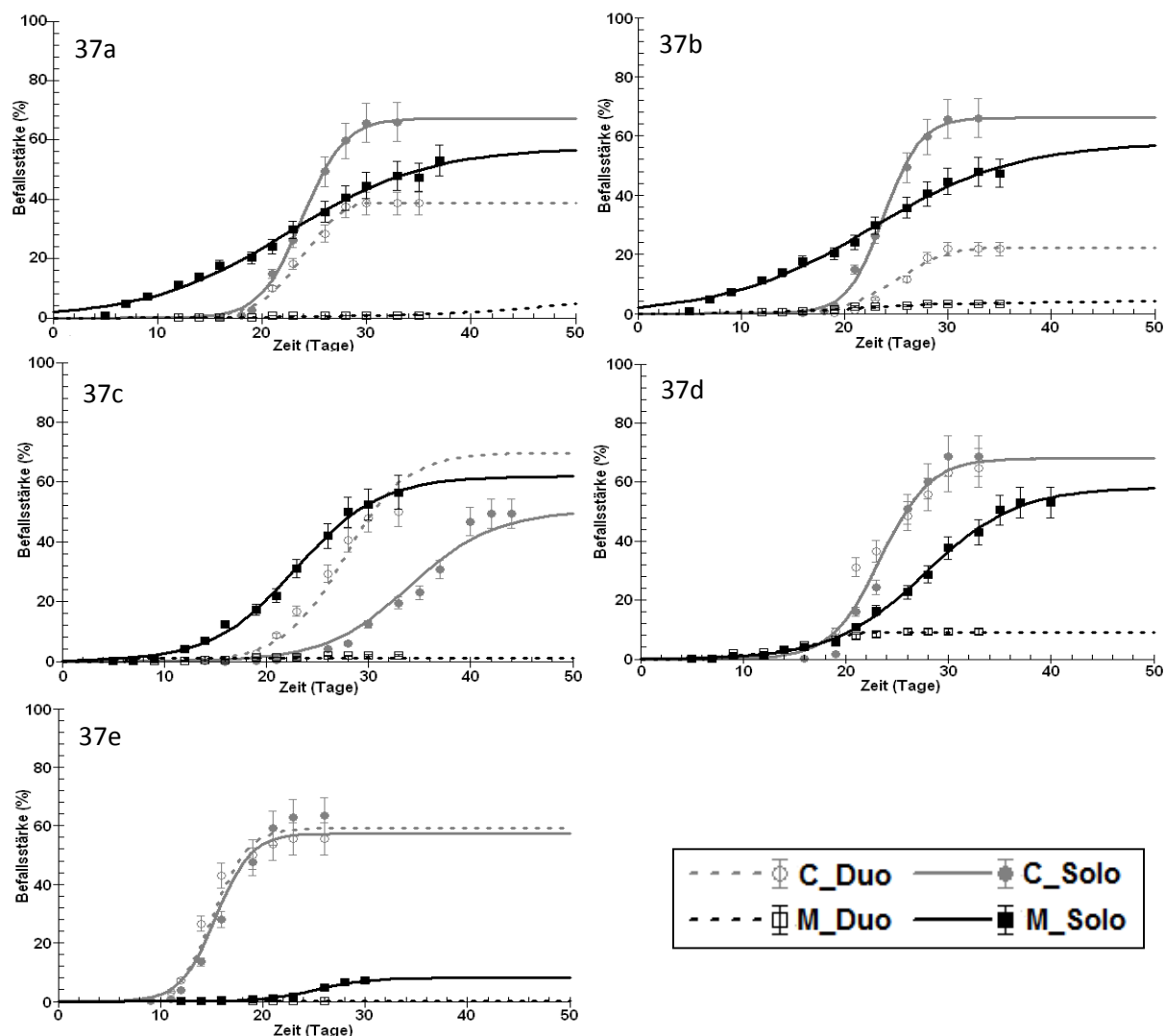


Abb. 37. Die graphische Darstellung des Interaktionsmodells auf Basis der Befallsstärke für die Versuche Sept_2011_1 (a), Sept_2011_2 (b), Nov_2011 (c), Mrz_2012 (d) und Mai_2012 (e) der Variante 1C2M.

Tab. 65. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Cercospora**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die Variante **1C2M** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (-) der Parameter wurde für diese Variante nicht benötigt, (#) Wert als fester Parameter während der Optimierung fixiert, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	$CO_{Solo}(\%)$ zu t_0	SE	$CO_{Duo}(\%)$	SE	$K_C(\%)$	SE	$r_C(1/Tag)$	SE	α_{CM}	SE		$r_C K_C(\%/Tag)$	
Sept_2011_1	0,01*	0,004	-	-	66,60*	1,21	0,54*	0,03	23,27*	6,18		35,96	
Sept_2011_2	0,13#		-	-	74,10*	3,12	0,42*	0,01	139,64	635,50		31,12	
Nov_2011	0,01	0,01	-	-	49,88*	1,30	0,32*	0,03	-24,05	59,69		15,96	
Mrz_2012	0,01*	0,004	-	-	70,77*	1,69	0,54*	0,05	2,66*	0,41		38,22	
Mai_2012	0,006	0,008	-	-	57,29*	1,80	0,59*	0,08	-7,20	37,20		33,80	
$\bar{x}$ (SE)	0,03	(0,05)	-	-	63,73	(9,98)	0,48	(0,11)	26,86	(65,33)		31,01	(8,81)

Tab. 66. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Mehltau**. Die approximierten Funktionsparameter der Variante **1C2M** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (#) Wert als fester Parameter während der Optimierung fixiert, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	$MO_{Solo}(\%)$ zu t_7	SE	$MO_{Duo}(\%)$ zu t_7	SE	$K_M(\%)$	SE	$r_M(1/Tag)$	SE	α_{MC}	SE		$r_M K_M(\%/Tag)$	
Sept_2011_1	1,94*	0,36	1,71*	0,46	57,69*	2,32	0,15*	0,01	134,42#			8,65	
Sept_2011_2	1,87	1,14	0,33	3,89	57,29*	7,21	0,15*	0,04	21,36	9.628,92		8,59	
Nov_2011	0,25	0,11	0,23	28,63	62,23*	2,99	0,24*	0,02	782,66	$2,77 \cdot 10^6$		14,94	
Mrz_2012	0,12	0,07	1,56*	0,55	58,29*	2,81	0,22*	0,02	3,95	2,65		12,82	
Mai_2012	0,006	0,07	0,12	0,63	8,58	9,04	0,40	0,73	2,39#			3,43	
$\bar{x}$ (SE)	0,84	(0,98)	0,79	(0,78)	48,82	(22,58)	0,23	(0,10)	188,96	(336,37)		9,69	(4,44)

Tab. 67. Das **Ergebnis der statistischen Analyse** der Modelloptimierung für die Variante **1C2M** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: R^2 = Bestimmtheitsmaß, WSS = Weighted sum of square, MSM = Model mean square, MSR = Residual mean square

Versuch	R^2	residual WSS	total WSS	MSM	MSR
Sept_2011_1	0,995	92,09	18338,33	2606,60	2,36
Sept_2011_2	0,956	1048,52	23977,50	3275,57	24,96
Nov_2011	0,93	146,82	19931,92	2478,99	3,58
Mrz_2012	0,992	154,98	20074,59	2489,95	5,00
Mai_2012	0,982	323,35	18448,83	2589,35	12,44

Die Auswertung des Konkurrenzcoeffizienten konnte wie schon bei der Variante C=M aufgrund der extremen Streuung nicht durchgeführt werden. Im Vergleich zu der Variante mit gleichzeitiger Inokulation waren diesmal nicht zwei, sondern nur einer der zehn geschätzten Konkurrenzcoeffizienten signifikant von 0 verschieden. Insbesondere bei der Schätzung des Einflussfaktors von Cercospora auf Mehltau traten Probleme bei der Optimierung mit der Methode nach Marquardt auf, trotzdem deutete die Statistik-Analyse auf eine gute Anpassung der Befallsstärke-Daten mit dem modifizierten LV-Modell hin (Tab. 67).

4.4.2.3 Das Interaktionsmodell für die Variante 1M2C

Im Vergleich zu den zwei vorherigen Kombinationen C=M und 1C2M konnte Mehltau in der Variante 1M2C in drei von fünf Versuchsdurchgängen der Duo-Variante eindeutig höhere Befallsstärken erreichen (Abb. 38b, d und e). Im Versuch Sept_2011_2 zeigte sich in der graphischen Darstellung (Abb. 38b), dass die geschätzte Kurve der Anpassung trotz Erreichen der maximalen Befallsstärke weiter anwuchs, obwohl dies die beobachteten Daten nicht hergaben. Das gleiche Phänomen wurde ebenfalls für den Versuch Sept_2011_1 beobachtet. In diesem Fall nahm die geschätzte Kurve aber erst nach dem Zeitpunkt $t = 50$ weiter zu, was aus Abbildung 38a, wegen des gewählten Zeitabschnittes der y-Achse, nicht hervor geht.

Die geschätzte Anfangsbefallsstärke, die für Mehltau in der Solo- wie auch in der Duo-Variante deutlich höher lag als für Cercospora, variierte zwischen 0,11 und 2,12 % für Mehltau in der Solo-Variante und zwischen 0,03 und 3,57 % in der Duo-Variante (Tab. 68 und 69). Cercospora erreichte nur geschätzte Befallsstärken von 0,004 bis 0,07 %.

Betrachtet man die Kapazität in den Solo-Varianten der beiden Blattkrankheiten, so dominierte in vier von fünf Fällen Cercospora über Mehltau mit einer höheren Befallsstärke. Der Wertebereich lag zwischen 50,42 und 68,02 %. In einem Fall erreichte Mehltau ein höheres Endbefallsniveau (Nov_2011). Die Kapazitäten hatten bei Mehltau ein Niveau zwischen 42,74 und 61,90 %. Die maximalen Befallsstärken in den Kombinationsvarianten zeigten in der graphischen Darstellung, dass

Mehltau trotz des früheren Inokulationstermins in der Interaktion durch *Cercospora* beeinflusst wurde. Die erreichten Befallsstärken befinden sich deutlich unterhalb des Niveaus, welches in den Solo-Varianten erzielt wurde.

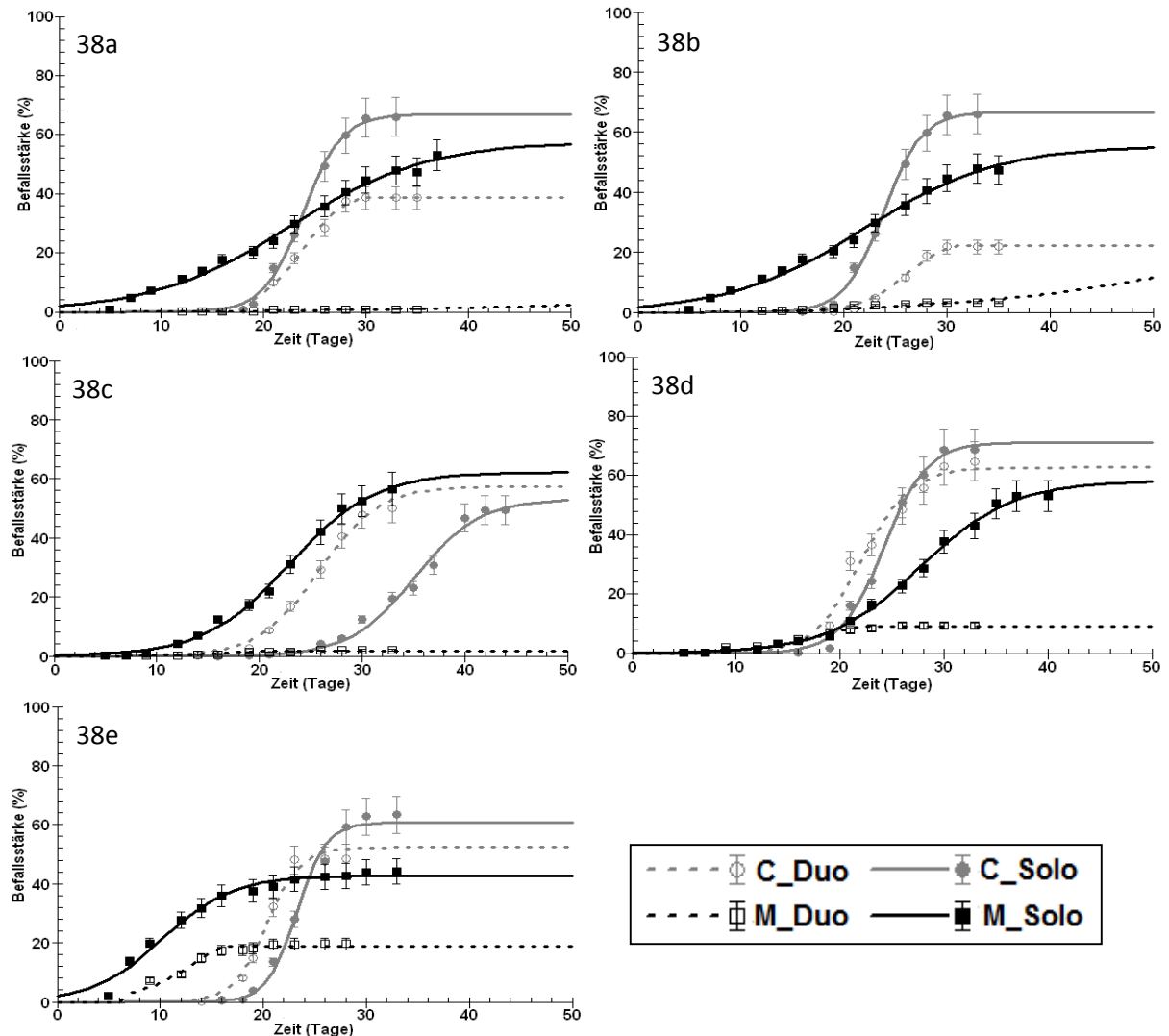


Abb. 38. Die graphische Darstellung des Interaktionsmodells auf Basis der Befallsstärke für die Versuche Sept_2011_1 (a), Sept_2011_2 (b), Nov_2011 (c), Mrz_2012 (d) und Mai_2012 (e) der Variante 1M2C.

Tab. 68. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Cercospora**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die Variante **1M2C** auf Basis der **Befallsstärke** Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (-) der Parameter wurde für diese Variante nicht benötigt, (#) Wert als fester Parameter während der Optimierung fixiert, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	$CO_{Solo}(\%)$ zu t_7	SE	$CO_{Duo}(\%)$ zu t_7	SE	$K_C(\%)$	SE	$r_C(1/Tag)$	SE	α_{CM}	SE		$r_C K_C(\%/Tag)$	
Sept_2011_1	0,01	0,006	-	-	67,24*	1,137	0,51*	0,027	38,17	27,12		34,29	
Sept_2011_2	0,004	0,003	-	-	66,11*	1,176	0,57*	0,040	12,48*	2,485		37,68	
Nov_2011	0,07	0,060	-	-	50,42*	3,294	0,24*	0,030	-17,1	15,00		12,10	
Mrz_2012	0,07	0,050	-	-	68,02*	2,500	0,42*	0,048	-0,01	0,195		28,57	
Mai_2012	0,01	0,017	-	-	56,19*	2,380	0,55*	0,095	-0,26*	0,102		30,90	
$\bar{x}$ (SD)	0,03	(0,03)			61,60	(7,87)	0,458	(0,13)	6,65	(20,52)		28,71	(9,90)

Tab. 69. Das **Ergebnis der Modelloptimierung** für **Mehltau**. Die geschätzten Parameterwerte des Interaktionsmodells für die **1M2C** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), t = Zeit, K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), SE = Standardfehler, $\bar{x}$ = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, (#) Wert als fester Parameter während der Optimierung fixiert, (*) geschätzter Parameterwert ist signifikant von Null verschieden (t-Test, $p = 0,05$)

Versuch	$MO_{Solo}(\%)$ zu t_0	SE	$MO_{Duo}(\%)$ zu t_7	SE	$K_M(\%)$	SE	$r_M(1/Tag)$	SE	α_{MC}	SE		$r_M K_M(\%/Tag)$	
Sept_2011_1	1,89*	0,315	0,03	0,025	57,42*	2,128	0,15*	0,010	0,50	0,292		8,61	
Sept_2011_2	2,12*	0,356	0,25*	0,065	57,74*	3,02	0,14*	0,010	2,21*	0,240		8,08	
Nov_2011	0,23	0,166	0,85	11,109	61,90*	4,515	0,24*	0,034	289,50	13372		14,86	
Mrz_2012	0,11	0,100	0,64	0,366	58,20*	4,22	0,22*	0,035	1,83	1,480		12,80	
Mai_2012	2,07	1,385	3,57	1,59	42,74*	2,00	0,29*	0,068	12,24	13,57		12,39	
$\bar{x}$ (SD)	1,28	(1,02)	1,07	(1,44)	55,60	(7,41)	0,21	(0,06)	61,26	(127,68)		11,35	(2,90)

Tab. 70. Das **Ergebnis der statistischen Analyse** der Modelloptimierung für die Variante **1M2C** auf Basis der **Befallsstärke**. Abk.: R^2 = Bestimmtheitsmaß, WSS = Weighted sum of square, MSM = Model mean square, MSR = Residual mean square

Versuch	R^2	residual WSS	total WSS	MSM	MSR
Sept_2011_1	0,9965	66,18	19034,97	2371,1	1,89
Sept_2011_2	0,9951	80,39	16311,13	2028,84	2,36
Nov_2011	0,9814	312,79	16800,33	2060,94	8,45
Mrz_2012	0,9827	395,61	22914,56	2814,87	11,64
Mai_2012	0,9564	580,53	13323,61	1592,89	18,73

Bei Cercospora waren in der Variante 1M2C im Gegensatz zu 1C2M nur zwei mögliche Entwicklungen der Befallsstärke vorhanden. In vier von fünf Versuchsdurchgängen hatten die Interaktionen einen negativen Effekt auf die Befallsstärke, da das erreichte Niveau unterhalb der Solo-Variante lag (Abb. 38a, b, d und e) und in einem Fall erreichte Cercospora ein höheres Niveau der Befallsstärke als in der Solo-Variante (Abb. 38c), was durch einen negativen Konkurrenzkoeffizienten in der Modellierung abgebildet wurde (Nov_2011). Ein gleich hohes Niveau von Cercospora in der Solo- und Duo-Variante wurde, anders als bei 1C2M, in keinem der Versuchsdurchgänge dokumentiert.

Die geschätzten Wachstumsraten für Cercospora erreichten in der Variante 1M2C ein höheres Niveau als die für Mehltau. Sie variierten zwischen 0,24 und 0,57/Tag für Cercospora bzw. zwischen 0,14 und 0,29/Tag für Mehltau. Die Betrachtung der absoluten Raten r_{CK_C} und r_{MK_M} zeigte, dass auch bei diesem zusätzlich berechneten Parameter die Dominanz von Cercospora klar zum Ausdruck kam, da die perthotrophe Blattkrankheit Werte zwischen 12,10 und 34,29 %/Tag aufwies und Mehltau nur Werte zwischen 8,08 und 14,86 %/Tag vorweisen konnte.

Die Konkurrenzkoeffizienten deckten im Vergleich zu den zuvor betrachteten Interaktionsvarianten einen geringen Wertebereich ab. Der Faktor, der den Einfluss von Cercospora auf Mehltau beschrieb, hatte Werte zwischen -17,1 und 38,17. Der umgekehrte Fall (Einfluss Mehltau auf Cercospora) streute höher. Die Werte lagen zwischen 0,50 und 289,50.

Die Bestimmtheitsmaße wie auch die anderen statistischen Kennzahlen zur Bewertung der Approximation zeigten auch in diesem Fall eine hohe Übereinstimmung der Daten mit dem Modell (Tab. 70).

4.4.2.4 Der statistische Vergleich der Varianten und Versuchsdurchgänge in den Interaktionsvarianten anhand der Befallsstärke

Der statistische Vergleich der verschiedenen Parameter für Cercospora und Mehltau wies auf keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Kombinationsvarianten hin (Tab. 71 und 72). Die mittleren Startwerte für Cercospora in der Solo-Variante lagen für C=M bei 0,01 % sowie für 1C2M

und 1M2C bei 0,03 %. Mehltau erzielte in der Solo-Variante im Mittel für C=M 0,89 %, für 1C2M 0,84 % und für 1M2C 1,28 %. Der biotrophe Pilz begann somit im Vergleich zu Cercospora mit deutlich höheren Befallsstärken.

Der Anfangsbefall in der Duo-Variante wurde nur für Mehltau ausgewertet, da er für Cercospora in keiner der Interaktionsvarianten verwendet wurde. Es wurde für diesen Parameter kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten festgestellt.

Bei Betrachtung der mittleren Wachstumsrate lag der Vorteil wie schon bei der Befallshäufigkeit zu Gunsten von Cercospora. Die Duo-Variante C=M hatte den geringsten Wert mit 0,44/Tag. An zweiter Position war die Kombination 1M2C mit 0,46/Tag und an erster lag 1C2M mit 0,48/Tag. Bei Mehltau hatte ebenfalls C=M die geringste Rate mit 0,18/Tag gefolgt von 1M2C und 1C2M mit 0,21 und 0,23/Tag.

Auch das zusätzlich berechnete Produkt aus Wachstumsrate und Kapazität zeigte für Cercospora eine eindeutige Dominanz in der Interaktion an. Den höchsten Wert erzielte im Mittel die Variante 1C2M mit 31,01 %/Tag, gefolgt von 1M2C mit 28,71 %/Tag und C=M mit 27,70 %/Tag. Bei Mehltau war das Niveau über alle Interaktionskombinationen deutlich niedriger. Das höchste Produkt lag bei 11,35 %/Tag (1M2C). Danach folgten die Varianten C=M und 1C2M auf dem gleichen Niveau mit 9,61 und 9,69 %/Tag.

Die Bewertung der Konkurrenzoeffizienten muss, wie in den Kapiteln zuvor beschrieben, kritisch betrachtet werden (Tab. 71 und 72). Obwohl die Mittelwerte der drei Kombinationsvarianten sich auf den ersten Blick deutlich voneinander unterschieden, zeigte der Tukey-Test keine signifikanten Unterschiede auf. Ein Grund hierfür war sicherlich in der hohen Streuung der Daten zu finden. Demzufolge wurde keine vergleichende Aussage zwischen den einzelnen Duo-Varianten für diesen Funktionsparameter vorgenommen.

Tab. 71. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Cercospora** auf Basis der **Befallsstärke** in den drei Interaktionsvarianten **C=M**, **1C2M** und **1M2C**. Die Tabelle der Mittelwerte muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), K_C = Kapazität (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag), t = Zeit

Variante	Startpunkt Modellierung	$CO_{Solo}(\%)$	$r_C(1/Tag)$	α_{CM}	$r_C K_C(\%/Tag)$
C=M (n = 5)	t_0	0,01a	0,44a	1417,93a	27,70a
1C2M (n = 5)	t_0	0,03a	0,48a	26,86a	31,01a
1M2C (n = 5)	t_7	0,03a	0,46a	6,65a	28,71a

Tab. 72. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Mehltau** auf Basis der **Befallsstärke** in den drei Interaktionsvarianten **C=M, 1C2M und 1M2C**. Die Tabelle der Mittelwerte muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag), t = Zeit

Variante	Startpunkt der Modellierung (Solo)	MO_{Solo} (%)	Startpunkt der Modellierung (Duo)	MO_{Duo} (%)	r_M (1/Tag)	α_{MC}	$r_M K_M$ (%/Tag)
C=M (n = 5)	t_0	0,89a	t_0	0,28a	0,18a	632,52a	9,61a
1C2M (n = 5)	t_7	0,84a	t_7	0,79a	0,23a	188,96a	9,69a
1M2C (n = 5)	t_0	1,28a	t_7	1,07a	0,21a	61,26a	11,35a

Im Gegensatz zum Varianten-Vergleich konnten Unterschiede bei der statistischen Gegenüberstellung der fünf Versuchsdurchgänge festgestellt werden (Tab. 73 und 74). Mehltau in der Solo-Variante zeigte in den beiden September-Versuchen einen signifikant höheren Anfangsbefallswert als in den Versuchen von Nov_2011 und Mrz_2012. Eine Ursache hierfür dürfte die Nutzung von Mittelwerten der nachfolgenden Solo-Varianten sein, da im September-Versuch noch keine eigenen Solo-Varianten parallel zu den Interaktionsvarianten geführt wurden. Bei Cercospora gab es keine signifikanten Unterschiede für CO_{Solo} zwischen den fünf Versuchsdurchgängen. In der Duo-Variante von Mehltau konnte ebenfalls kein signifikanter Unterschied für den Anfangsbefall festgestellt werden.

Die Gegenüberstellung der Wachstumsraten zeigte nur Differenzen zwischen den Versuchsdurchgängen von Cercospora auf. Hier hatte Nov_2011 die geringste Rate vorzuweisen mit 0,29/Tag. Die absoluten Raten $r_C K_C$ und $r_M K_M$ zeigten für Cercospora ein ähnliches Ergebnis wie schon bei der Wachstumsrate beschrieben. Der November-Versuch hatte das geringste Produkt mit 15,00 %/Tag. Bei Mehltau unterschied sich die absolute Rate des November-Versuchs signifikant (14,92 %/Tag) vom Mai-Versuch (5,61 %/Tag).

Bei Betrachtung der mittleren Konkurrenzkoefizienten fiel erneut die große Streuung zwischen den einzelnen Werten auf. Bei Cercospora variierten diese zwischen –14,94 und 2319,37 und bei Mehltau zwischen 2,89 und 929,61. Ein signifikanter Unterschied wurde mit der Varianz-Analyse nicht festgestellt. Eine Interpretation der Ergebnisse war aufgrund der hohen Variabilität nicht möglich.

Tab. 73. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) f der geschätzten Parameterwerte ür **Cercospora** auf Basis der **Befallsstärke** in den fünf Versuchsdurchgänge **Sept_2011_1**, **Sept_2011_2**, **Nov_2011**, **Mrz_2012** und **Mai_2012**. Die Tabelle der Mittelwerte muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: CO_{Solo} und CO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), r_C = Wachstumsrate (1/Tag), α_{CM} = Einfluss Mehltau auf Cercospora, $r_C K_C$ = Produkt aus r_C und K_C (%/Tag)

Variante	$CO_{Solo}(\%)$	$r_C(1/Tag)$	α_{CM}	$r_C K_C(\%/Tag)$
Sept_2011_1 (n = 3)	0,01a	0,53a	45,67a	35,39a
Sept_2011_2 (n = 3)	0,05a	0,52a	73,08a	35,30a
Nov_2011 (n = 4)	0,02a	0,29b	-14,94a	15,00b
Mrz_2012 (n = 2)	0,04a	0,48a	1,33a	33,39a
Mai_2012 (n = 3)	0,01a	0,55a	2319,37a	32,75a

Tab. 74. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für **Mehltau** auf Basis der **Befallsstärke** in den fünf Versuchsdurchgänge **Sept_2011_1**, **Sept_2011_2**, **Nov_2011**, **Mrz_2012** und **Mai_2012**. Die Tabelle muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: MO_{Solo} und MO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α_{MC} = Einfluss Cercospora auf Mehltau, $r_M K_M$ = Produkt aus r_M und K_M (%/Tag)

Variante	$MO_{Solo}(\%)$	$MO_{Duo}(\%)$	$r_M(1/Tag)$	α_{MC}	$r_M K_M(\%/Tag)$
Sept_2011_1 (n = 3)	1,93a	0,60a	0,15a	47,17a	8,64ab
Sept_2011_2 (n = 3)	1,92a	0,17a	0,15a	14,50a	8,39ab
Nov_2011 (n = 4)	0,24b	0,10a	0,24a	929,61a	14,92a
Mrz_2012 (n = 2)	0,12b	1,08a	0,22a	2,89a	12,81ab
Mai_2012 (n = 3)	0,77ab	1,01a	0,28a	168,15a	5,61b

4.4.2.5 Der statistische Vergleich zwischen Cercospora und Mehltau in den Interaktionsvarianten anhand der Befallsstärke

Der Vergleich zwischen den beiden Blattkrankheiten auf Basis der Befallsstärke zeigte, dass Mehltau bis auf den Anfangsbefall in der Solo-Variante im Mittel immer schlechter abschnitt als Cercospora (Tab. 75). Bei den Kapazitäten wurde ein Niveau von 51,21 % erreicht, im Gegensatz zu Cercospora mit einer maximalen Befallsstärke von 62,08 %. Bei der Wachstumsrate wurde im Mittel eine Rate von 0,21/Tag erzielt, wohingegen Cercospora mit 0,46/Tag mehr als doppelte so viel vorweisen konnte. Dies spiegelt sich auch in der absoluten Rate wider, die mit 10,21 %/Tag (Mehltau) deutlich unterhalb von 29,14 %/Tag (Cercospora) lag.

Bei Betrachtung des geschätzten Anfangsbefalls in der Solo-Variante gab es den einzigen Fall, in dem Mehltau mit 1,0 % über Cercospora mit 0,02 % dominierte. Demzufolge konnte Mehltau den Vorsprung in der Etablierungsphase der Blattkrankheiten nicht zu seinen Gunsten nutzen. Ein Vergleich des Anfangsbefalls in der Duo-Variante zwischen den beiden Blattkrankheiten war nicht möglich, da für Cercospora kein zusätzlicher Anfangsparameter der Duo-Variante verwendet wurde.

Die Mittelwerte der geschätzten Konkurrenzoeffizienten der beiden Krankheiten nahmen wegen einiger Ausreißer innerhalb der Stichprobe enorm hohe Werte an (483,82 und 294,24). Diese Zahlen deuten daraufhin, dass der Einfluss von Mehltau auf *Cercospora* größer war als umgekehrt, was durch die Detailbeschreibung der Einzelfälle nicht bestätigt wurde. Wegen dieser Problematik ist eine Interpretation der Konkurrenzoeffizienten auf Basis der Befallsstärke nicht möglich.

Tab. 75. Das **Ergebnis der Varianz-Analyse** (Tukey-Test, $p = 0,05$) der geschätzten Parameterwerte für ***Cercospora*** und **Mehltau** über **alle Versuche und alle Interaktionsvarianten**. Als Datenbasis diente die **Befallsstärke**. Die Tabelle muss spaltenweise gelesen werden. Werte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant. Abk.: yO_{Solo} und yO_{Duo} = Anfangsbefall in der Solo- bzw. Duo-Variante (%), K_M = Kapazität (%), r_M = Wachstumsrate (1/Tag), α = Konkurrenzoeffizient, rK = Produkt aus r und K (%/Tag), x = kein Vergleich durchführbar, da dieser Parameter für *Cercospora* in der Variante 1C2M fehlt. Für den Konkurrenzoeffizienten wurde ausschließlich geprüft, ob ein signifikanter Unterschied zu Null vorhanden ist. Werte mit einem (*) unterscheiden sich signifikant zu Null.

Variante	$yO_{Solo}(\%)$	$yO_{Duo}(\%)$	$K(\%)$	$r(1/\text{Tag})$	α	rK
<i>Cercospora</i> (n = 15)	0,02b	x	62,08a	0,46a	483,82	29,14a
Mehltau (n = 15)	1,0a	x	51,21b	0,21b	294,24	10,21b

4.4.3 Der Vergleich von klassischem und modifiziertem Lotka-Volterra-Modell

4.4.3.1 Die Vergleichsanalyse bei gleichzeitiger Inokulation beider Krankheiten (C=M)

Für die Variante ohne zeitlichen Vorsprung einer Krankheit wurden zwei verschiedene Fälle betrachtet. Zum einen die Konkurrenzsituation zum Vorteil für *Cercospora*, deren graphische Darstellungen der Abbildungen 39a bis f zu entnehmen sind. Die entsprechenden Beschreibungen befinden sich in Auflistung 1. Zum anderen die Konkurrenzsituation zum Vorteil für Mehltau, die in den Abbildungen 40a bis f dargestellt sind (Auflistung 2).

Der Vergleich einer Konkurrenzsituation mit dem Vorteil für *Cercospora* zeigte, unter Annahme der gleichen Raten der beiden Blattkrankheiten, dass die Krankheit mit der höheren Kapazität Vorteile aus der Interaktion zog (Abb. 39a und b). Mehltau schnitt in diesem Fall in der Duo-Variante deutlich schlechter ab als *Cercospora*. Bewertet man zusätzlich noch den Einfluss des modifizierten Ansatzes des LV-Modells (b), so bewirkte dieser eine Stabilisierung von Mehltau in der Duo-Variante. Die Nutzung des klassischen LV-Modells (a) führte nach dem Erreichen der maximalen Befallshäufigkeit zu einem leichten Rückgang im Befallsniveau von Mehltau in der Interaktion.

Auf den Einsatz einer höheren Rate für *Cercospora* (Abb. 39c und d) reagierte das Modell mit einem früheren Auftreten und einer damit verbundenen schnelleren Entwicklung für den perthotropen Pilz. Mehltau erfuhr unter diesen Bedingungen eine Verzögerung in der Rate und in der Duo-Variante auch eine Reduzierung in der maximalen Befallshäufigkeit. Die Verwendung des modifizierten LV-Modells unter diesen Bedingungen zeigte zwei Effekte (vergleiche c zu d). *Cercospora*, welche die schnellere Entwicklung in dieser Situation aufwies, blieb in der Interaktion auf dem Befallsniveau der Solo-Variante und fiel nicht im maximalen Niveau ab, was positiv bewertet werden konnte. Mehltau hingegen blieb in der Kombination unterhalb der maximalen Befallshäufigkeit des klassischen Modellansatzes. Diese Entwicklung konnte als negative Eigenschaft der Modifikation bezeichnet werden.

Unter Verwendung einer höheren Rate für Mehltau (Abb. 39e und f) entwickelte sich der biotrophe Pilz schneller und erreichte in der Duo-Variante bei Verwendung des modifizierten LV-Modells ein gleich hohes Niveau wie in der Solo-Variante (f). *Cercospora* erfuhr unter dieser Annahme eine Benachteiligung und blieb in der Interaktion unterhalb der maximalen Befallshäufigkeit von Mehltau. Der Einsatz des modifizierten LV-Modells hatte auch in diesem Fall eine Stabilisierung zur Folge. Im klassischen Ansatz erreichte Mehltau zunächst fast die maximale Befallshäufigkeit der Solo-Variante, fiel danach aber im Befallsniveau um die Hälfte ab (e). *Cercospora* hingegen erhielt im klassischen Modell eine geringe Bevorteilung. Das maximale Befallsniveau der Krankheit mit der reduzierten Rate wurde leicht gesteigert. Betrachtet man beide Pilze über den gesamten Beobachtungszeitraum, so dominierte zu Beginn der Epidemie Mehltau über *Cercospora* und ab dem Zeitpunkt $t = 58$ kehrte

sich die Situation um und Cercospora übernahm die Führungsposition in der Interaktion. Im modifizierten Modell behielt Mehltau von Beginn bis zum Ende die dominante Position in der Duo-Variante.

Vergleicht man über alle sechs betrachteten Fälle die erreichten maximalen Befallshäufigkeiten, so stellte sich zum Ende des Betrachtungszeitraumes ein Gleichgewicht zwischen den beiden Blattkrankheiten ein. Im klassischen Modell erzielten Cercospora und Mehltau unabhängig von der untersuchten Wachstumsrate ein ähnliches Befallsniveau (Tab. 76). Für das modifizierte Modell sah die Situation anders aus. In diesem Fall nahm die gewählte Wachstumsrate enormen Einfluss, was sich durch große Differenzen zwischen den maximalen Befallshäufigkeiten zeigte. Die Gewichtung der Rate innerhalb des LV-Modells wurde durch die Verwendung der Modifikation eindeutig von einer geringen Bedeutung hin zu einer großen Einflussnahme verändert.

Auflistung 1. Die **Vergleichsanalyse** der Variante **C=M** mit folgender Grundannahme: Die Kapazitäten der beiden Krankheiten liegen bei $K_C = 100\%$ und $K_M = 90\%$. Der Konkurrenzkoefizient α_{MC} **hat den Wert 0,5** und α_{CM} **hat den Wert 0,25**. Daraus folgt, dass der Einfluss von Cercospora auf Mehltau doppelt so groß ist wie umgekehrt ($\alpha_{MC} > \alpha_{CM}$).

- klassisches LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert 0,2/Tag ($r_C = r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert 0,2/Tag ($r_C = r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,4/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,2/Tag ($r_C > r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,4/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,2/Tag ($r_C > r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,2/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,4/Tag ($r_C < r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,2/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,4/Tag ($r_C < r_M$).

Tab. 76. **Vergleich** der erreichten **maximalen Befallshäufigkeiten** (BH_{max}) der beiden Modellansätze „klassisch“ und „modifiziert“ unter der Voraussetzung ($\alpha_{MC} > \alpha_{CM}$) zum Zeitpunkt $t = 100$ in der Variante **C=M**.

Annahme klassisches LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)		Annahme modifiziertes LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)	
	C Duo	M Duo		C Duo	M Duo
$r_C = r_M$ (a)	88,45	45,98	$r_C = r_M$ (b)	87,53	49,85
$r_C > r_M$ (c)	89,32	43,38	$r_C > r_M$ (d)	99,04	38,94
$r_C < r_M$ (e)	88,42	45,90	$r_C < r_M$ (f)	78,17	87,17

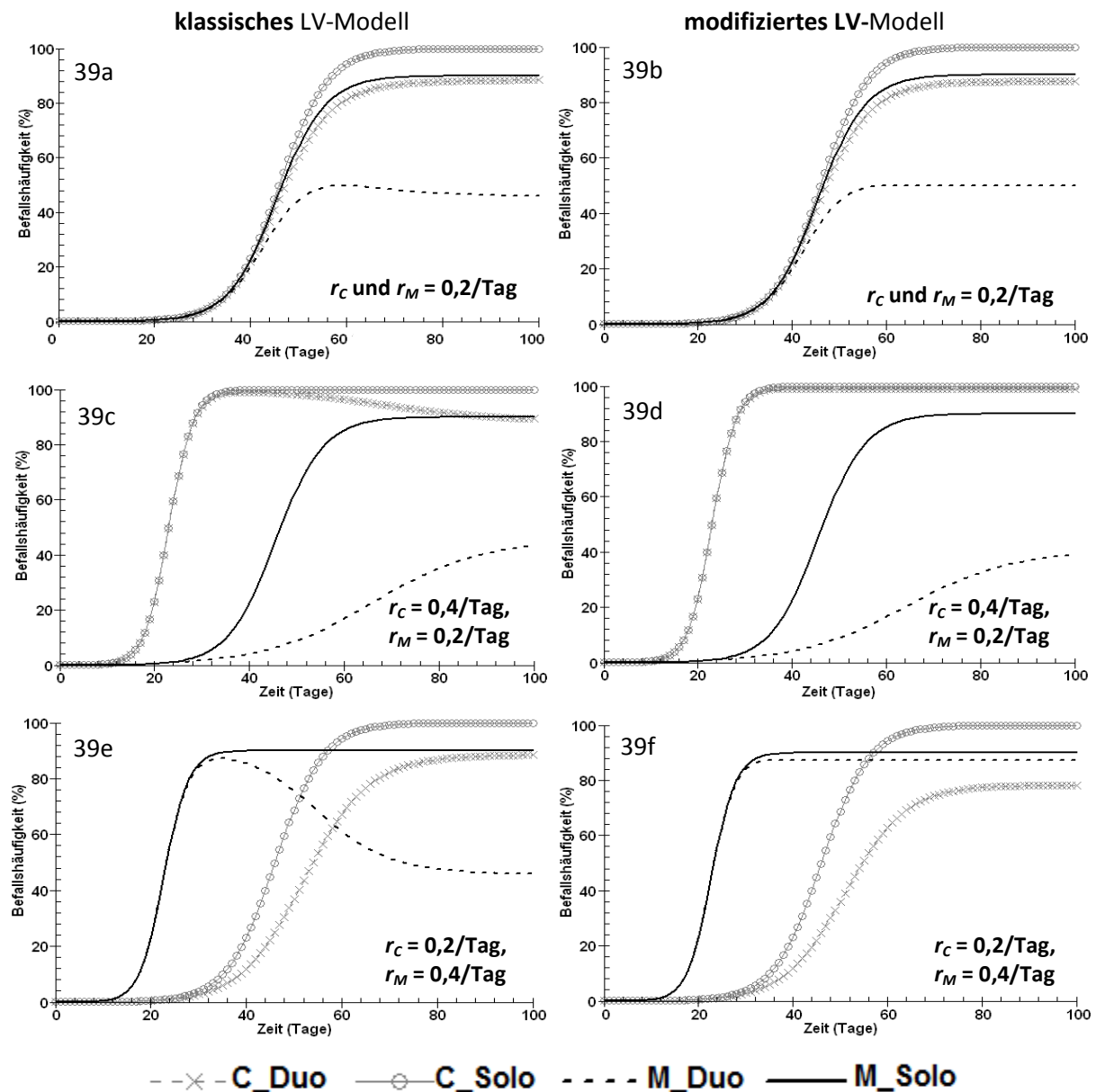


Abb. 39. (a-f) Die **Vergleichsanalyse des Interaktionsmodells** der Variante **C=M** mit dem Verhältnis der Konkurrenzkoefizienten α_{MC} ist größer als α_{CM} . Auf der linken Seite befindet sich das **klassische** LV-Modell (**a, c, e**) und auf der rechten Seite das **modifizierte** LV-Modell (**b, d, f**). Graphische Darstellung der Befallsverläufe bei sechs unterschiedlichen Annahmen für die Parameterwerte (Fälle a-f der Auflistung 1).

Die Betrachtung des Konkurrenzverhältnisses zum Vorteil für Mehltau zeigte bei gleicher Rate (Abb. 40a bis b), dass Mehltau in der Duo-Variante im Erreichen der maximalen Befallshäufigkeit über dem Niveau von Cercospora lag. In dieser Situation sah man kaum Unterschiede zwischen dem klassischen und dem modifizierten Ansatz.

Bei Verwendung von unterschiedlichen Wachstumsraten offenbarte sich jedoch im Vergleich der beiden Modellansätze ganz klar der Einfluss des modifizierten Modells auf die Interaktion. Die Krankheit mit der höheren Rate erfuhr in der Etablierungsphase einen Vorsprung gegenüber dem

schwächeren Partner (Abb. 40c bis f). Dieser Vorsprung wurde aber mit zunehmender Zeit immer geringer und führte in einem Fall sogar zu einer Umkehrung des Dominanzverhältnisses (Abb. 40c). Die Blattkrankheit mit der geringeren Rate erhielt im klassischen Modell einen positiven Effekt in Bezug auf die maximal zu erreichende Befallshäufigkeit (Abb. 40c und e). Das erzielte Niveau war um einige Prozentpunkte höher als im modifizierten Modellansatz. Der Stabilisierungseffekt des modifizierten Ansatzes nach WEBER (1992) nahm somit enormen Einfluss auf beide Blattkrankheiten positiv wie negativ betrachtet.

Wie schon in der Interaktion zu Gunsten von Cercospora beobachtet, stieg auch im Fall der Bevorteilung von Mehltau die Bedeutung der Rate in der Verwendung des modifizierten LV-Modells (Tab. 77). Die maximalen Befallshäufigkeiten lagen in den drei betrachteten Annahmen auf sehr unterschiedlichem Niveau im Gegensatz zum klassischen Ansatz.

Auflistung 2. Die **Vergleichsanalyse** der Variante **C=M** mit folgender Grundannahme: Die Kapazitäten der beiden Krankheiten liegen bei $K_C = 100\%$ und $K_M = 90\%$. Der Konkurrenzkoeffizient α_{MC} **hat den Wert 0,25** und α_{CM} **hat den Wert 0,5**. Daraus folgt, dass der Einfluss von Mehltau auf Cercospora doppelt so groß ist wie umgekehrt ($\alpha_{MC} < \alpha_{CM}$).

- klassisches LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert 0,2/Tag ($r_C = r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert 0,2/Tag ($r_C = r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,4/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,2/Tag ($r_C > r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,4/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,2/Tag ($r_C > r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,2/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,4/Tag ($r_C < r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert 0,2/Tag und die Rate von Mehltau hat den Wert 0,4/Tag ($r_C < r_M$).

Tab. 77. **Vergleich** der erreichten **maximalen Befallshäufigkeiten** (BH_{max}) der beiden Modellansätze „klassisch“ und „modifiziert“ unter der Voraussetzung ($\alpha_{MC} < \alpha_{CM}$) zum Zeitpunkt $t = 100$ in der Variante **C=M**.

Annahme klassisches LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)		Annahme modifiziertes LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)	
	C Duo	M Duo		C Duo	M Duo
$r_C = r_M$ (a)	62,90	74,26	$r_C = r_M$ (b)	63,17	74,20
$r_C > r_M$ (c)	63,03	74,12	$r_C > r_M$ (d)	97,22	65,64
$r_C < r_M$ (e)	61,82	74,66	$r_C < r_M$ (f)	54,97	88,86

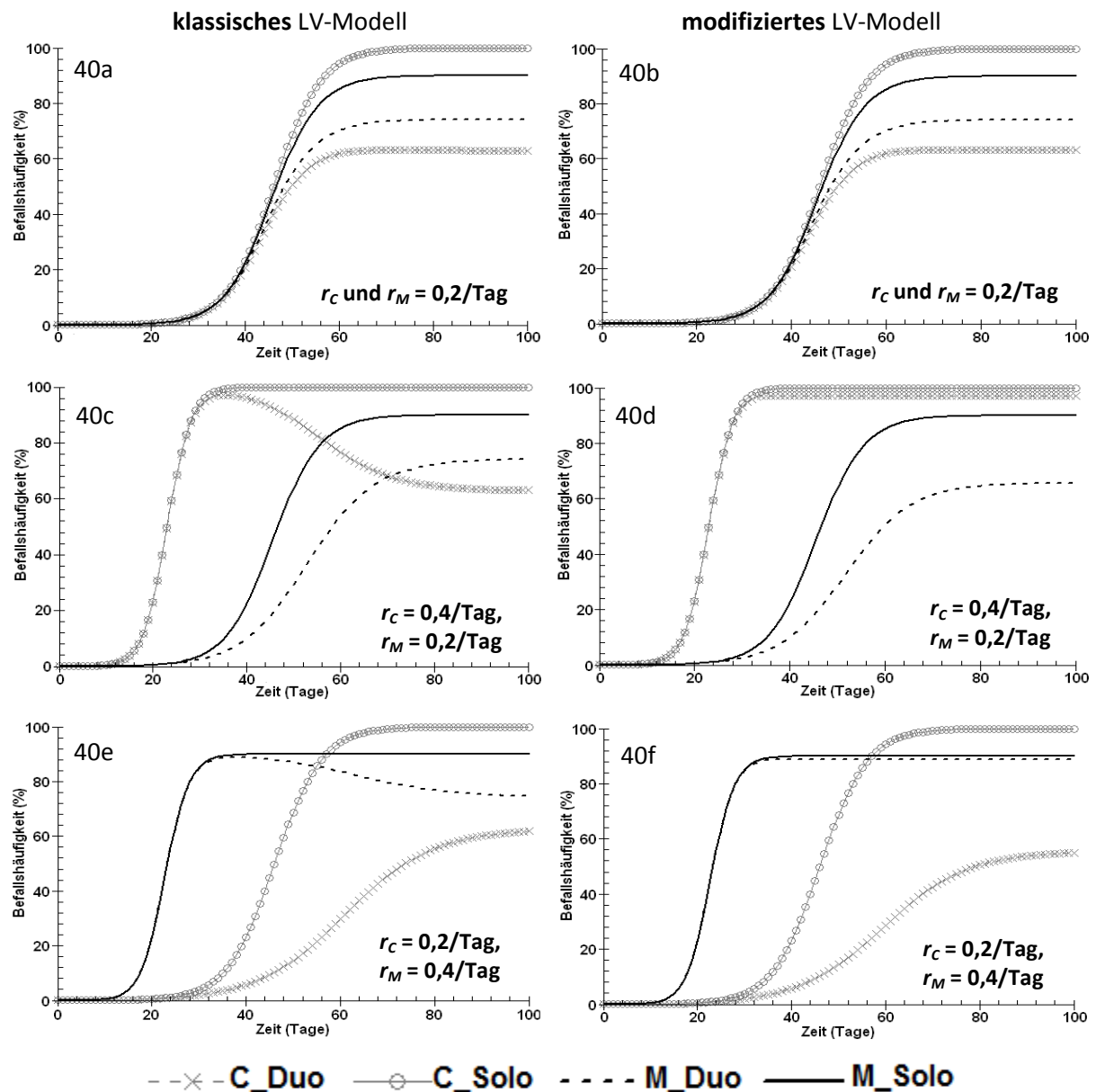


Abb. 40. (a-f) Die **Vergleichsanalyse des Interaktionsmodells** der Variante **C=M** mit dem Verhältnis der Konkurrenzkoefizienten α_{MC} ist kleiner als α_{CM} . Auf der linken Seite befindet sich das **klassische** LV-Modell (**a**, **c**, **e**) und auf der rechten Seite das **modifizierte** LV-Modell (**b**, **d**, **f**). Graphische Darstellung der sechs unterschiedlichen Annahmen für die Parameterwerte (Fälle a-f der Auflistung 2).

4.4.3.2 Die Vergleichsanalyse bei Erstinokulation von Cercospora (1C2M)

Bei der Interaktionsvariante 1C2M diente das Modell C=M als Basis. In diesem Fall wurde aber nicht für beide Krankheiten der gleiche Wert des Anfangsbefalls gewählt (0,01 %), sondern für die erste Krankheit Cercospora wurde ein Anfangsbefall von 0,1 % verwendet. Als Konsequenz aus dieser Startwertveränderung zum Zeitpunkt $t = 7$ besaß die erste Krankheit einen Vorsprung gegenüber der zweiten Krankheit.

Die Duo-Variante 1C2M wurde ebenfalls unter zwei Gesichtspunkten betrachtet. Einmal mit dem Vorteil für Cercospora in der Interaktion (Auflistung 3, Abb. 41a bis f) und einmal mit dem Nachteil für Cercospora in der Interaktion (Auflistung 4, Abb. 42a bis f).

Der Vorteil von Cercospora in der Etablierungsphase der Variante 1C2M zeigte sich bei Verwendung der gleichen Rate für beide Krankheiten (Abb. 41a und b) genauso wie auch unter der Annahme einer höheren Rate für Cercospora (Abb. 41c und d). Das Verhältnis der Krankheiten zueinander wurde nur dann umgekehrt, wenn Mehltau die höhere Rate vorweisen konnte (Abb. 41e und f). Die Wachstumsrate konnte demzufolge als einflussreicher Funktionsparameter bezeichnet werden, der insbesondere zu Beginn der Epidemie seine Wirkung zeigte. Dies galt insbesondere für das zu erreichende Gleichgewicht zum Ende des Beobachtungszeitraums. In dieser Phase der Beziehung der beiden Blattkrankheiten zueinander hatte im modifizierten Ansatz die Rate den größten Einfluss (Tab. 78), im klassischen Modell waren die Kapazität und der Konkurrenzkoeffizient die bestimmenden Faktoren.

Auflistung 3. Die **Vergleichsanalyse** der Variante **1C2M** mit folgender Grundannahme: Die Kapazitäten der beiden Krankheiten liegen bei $K_C = 100\%$ und $K_M = 90\%$. Der Konkurrenzkoeffizient α_{MC} hat den Wert **0,5** und α_{CM} hat den Wert **0,25**. Daraus folgt, dass der Einfluss von Cercospora auf Mehltau doppelt so groß ist wie umgekehrt ($\alpha_{MC} > \alpha_{CM}$).

- klassisches LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert **0,2/Tag** ($r_C = r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert **0,2/Tag** ($r_C = r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,4/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,2/Tag** ($r_C > r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,4/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,2/Tag** ($r_C > r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,2/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,4/Tag** ($r_C < r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,2/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,4/Tag** ($r_C < r_M$).

Tab. 78. **Vergleich** der erreichten **maximalen Befallshäufigkeiten** (BH_{max}) der beiden Modellansätze „klassisch“ und „modifiziert“ unter der Voraussetzung ($\alpha_{MC} > \alpha_{CM}$) zum Zeitpunkt $t = 100$ in der Variante **1C2M**.

Annahme klassisches LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)		Annahme modifiziertes LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)	
	C Duo	M Duo		C Duo	M Duo
$r_C = r_M$ (a)	88,88	45,01	$r_C = r_M$ (b)	92,67	43,36
$r_C > r_M$ (c)	89,89	41,54	$r_C > r_M$ (d)	99,61	37,27
$r_C < r_M$ (e)	88,55	45,74	$r_C < r_M$ (f)	80,74	77,02

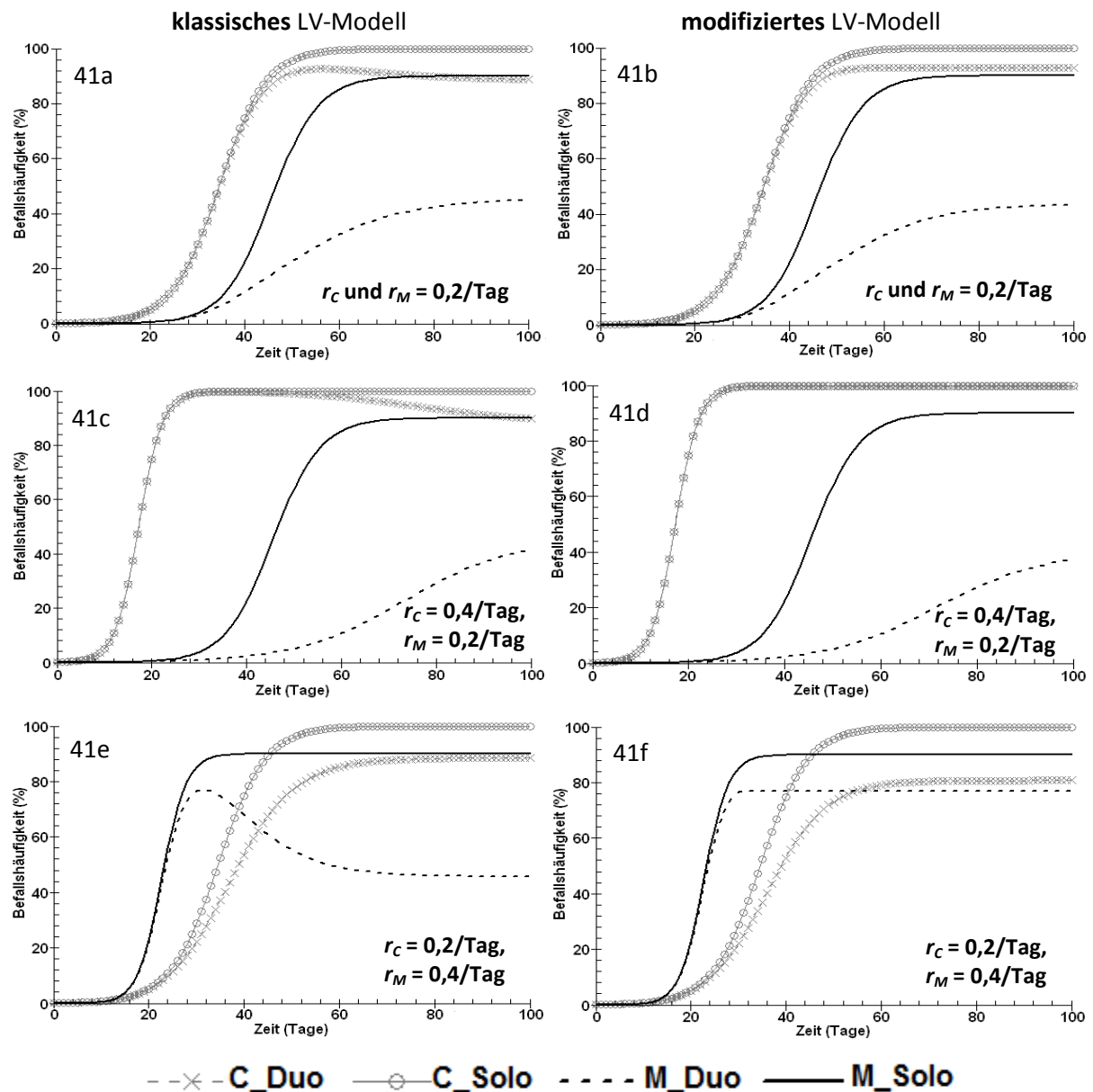


Abb. 41. (a-f) Die **Vergleichsanalyse des Interaktionsmodells** der Variante **1C2M** mit dem Verhältnis der Konkurrenzkoefizienten α_{CM} ist kleiner als α_{MC} . Auf der linken Seite befindet sich das **klassische** LV-Modell (**a, c, e**) und auf der rechten Seite das **modifizierte** LV-Modell (**b, d, f**). Graphische Darstellung der sechs unterschiedlichen Annahmen für die Parameterwerte (Fälle a-f der Auflistung 3).

Der Einsatz des modifizierten LV-Modells ergab auch in der Variante 1C2M eine enorme Stabilisierung zum Vorteil der Blattkrankheit, die zu Beginn der Epidemie dominierte. Bei gleicher Rate beider Krankheiten wie auch bei erhöhter Rate für Cercospora erzielte das modifizierte Modell ein Niveau der maximalen Befallshäufigkeit für Cercospora, das oberhalb der Solo-Variante von Mehltau lag (Abb. 41b) oder auf einem Niveau mit der Solo-Variante von Cercospora anzusiedeln war (Abb. 41d). Die Verwendung des klassischen Modells führte in beiden Fällen zu einem Rückgang der maximalen Befallshäufigkeit auf das Niveau der Solo M Variante (Abb. 41a und c). Bei Mehltau führte

die Verwendung des modifizierten Modells zu einem negativen Effekt. Die maximale Befallshäufigkeit der Krankheit erreichte nicht das Niveau, welches im klassischen Ansatz erzielt wurde.

In der Situationen einer höheren Rate von Mehltau nahm der Einsatz der Modifizierung den größten Einfluss auf die Interaktion in der Duo-Variante. Im klassischen Modell fiel das Befallsniveau nach $t = 32$ von 77 auf 45 % ab und lag damit deutlich unterhalb von Cercospora, dessen Befallshäufigkeit bei knapp 90 % anzusiedeln war. Die Modifizierung führte in der Duo-Variante dazu, dass Mehltau eine maximale Befallshäufigkeit von 77 % erreichte und diese bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes hielt. Cercospora befand sich in dieser Situation nur knapp oberhalb von Mehltau, was einer ausgeglichenen Interaktion entsprach.

Auflistung 4. Die **Vergleichsanalyse** der Variante **1C2M** mit folgender Grundannahme: Die Kapazitäten der beiden Krankheiten liegen bei $K_C = 100\%$ und $K_M = 90\%$. Der Konkurrenzkoeffizient α_{MC} hat den Wert **0,25** und α_{CM} hat den Wert **0,5**. Daraus folgt, dass der Einfluss von Mehltau auf Cercospora doppelt so groß ist wie umgekehrt ($\alpha_{MC} < \alpha_{CM}$).

- klassisches LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert **0,2/Tag** ($r_C = r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Beide Raten (r_C und r_M) haben den Wert **0,2/Tag** ($r_C = r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,4/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,2/Tag** ($r_C > r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,4/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,2/Tag** ($r_C > r_M$).
- klassisches LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,2/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,4/Tag** ($r_C < r_M$).
- modifiziertes LV-Modell: Die Rate von Cercospora (r_C) hat den Wert **0,2/Tag** und die Rate von Mehltau hat den Wert **0,4/Tag** ($r_C < r_M$).

Tab. 79. **Vergleich** der erreichten **maximalen Befallshäufigkeiten** (BH_{max}) der beiden Modellansätze „klassisch“ und „modifiziert“ unter der Voraussetzung ($\alpha_{MC} < \alpha_{CM}$) zum Zeitpunkt $t = 100$ in der Variante **1C2M**.

Annahme klassisches LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)		Annahme modifiziertes LV-Modell (Abb.)	BH_{max} zum Zeitpunkt t_{100} (%)	
	C Duo	M Duo		C Duo	M Duo
$r_C = r_M$ (a)	63,25	74,06	$r_C = r_M$ (b)	81,53	69,60
$r_C > r_M$ (c)	63,07	74,07	$r_C > r_M$ (d)	98,78	65,22
$r_C < r_M$ (e)	62,74	74,33	$r_C < r_M$ (f)	57,84	84,24

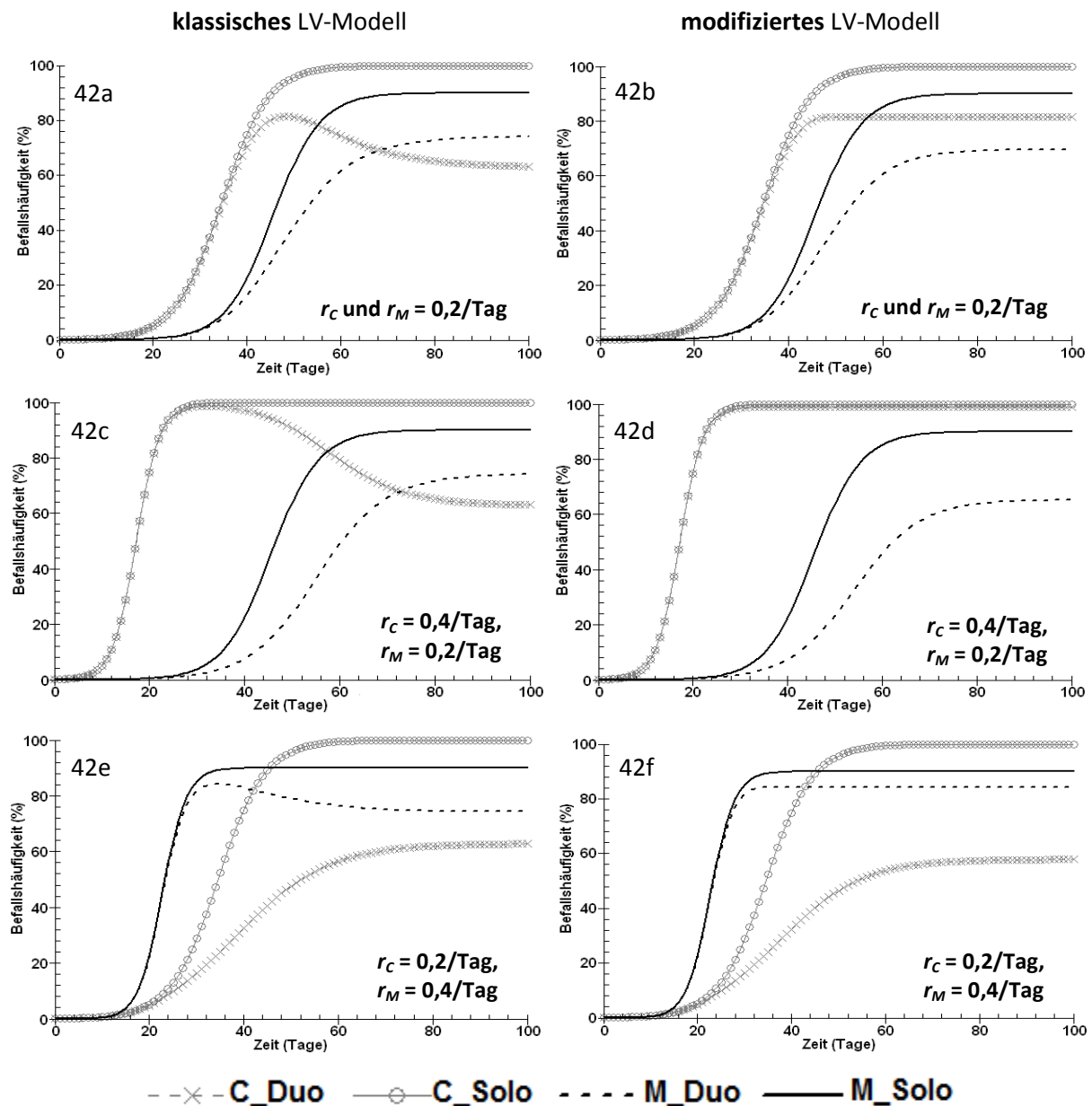


Abb. 42. (a-f) Die **Vergleichsanalyse des Interaktionsmodells** der Variante **1C2M** mit dem Verhältnis der Konkurrenzkoefizienten α_{MC} ist kleiner als α_{CM} . Auf der linken Seite befindet sich das **klassische** LV-Modell (**a, c, e**) und auf der rechten Seite das **modifizierte** LV-Modell (**b, d, f**). Graphische Darstellung der sechs unterschiedlichen Annahmen für die Parameterwerte (Fälle a-f der Auflistung 4).

Auch die Konkurrenzsituation zum Vorteil für Mehltau zeigte die enorme Einflussnahme durch die Modifikation des LV-Modells (Abb. 42a bis f). Die Krankheit, die einen Vorteil in der Etablierungsphase hatte, konnte diese unter Verwendung des klassischen Modells nicht aufrecht erhalten (Abb. 42a, c und e). Zum Ende des Beobachtungszeitraums erstarkte die zu Beginn schwächere Krankheit und konnte das Dominanzverhältnis in zwei der drei Fälle so gar umkehren (Abb. 42a und c). Dies war im modifizierten System nicht möglich (Abb. 42b, d und f). Die erste Krankheit blieb hier der dominierende Partner.

Für die zweite Krankheit in der Etablierungsphase brachte die Modifikation, wie schon bei der Variante C=M festgestellt, eher Nachteile, denn die maximale Befallshäufigkeit wurde reduziert und somit war das Befallsniveau geringer als im klassischen Modell.

Auch in diesem Fall wurde die Zunahme der Bedeutung der Rate im modifizierten Ansatz sichtbar (Tab. 79). Ihr Effekt auf die maximale Befallshäufigkeit zum Ende des Beobachtungszeitraums wurde durch die Veränderung der Funktion enorm gestärkt. Ihr Einfluss im klassischen Modell auf das Endgleichgewicht spielte keine Rolle im Vergleich zur Kapazität und den Konkurrenzkoeffizienten.

4.4.3.3 Die Vergleichsanalyse bei Erstinokulation von Mehltau (1M2C)

Auch für diese Interaktionskombination diente die Variante C=M als Basis. Diesmal erhielt jedoch der Mehltau einen höheren Anfangsbefall (0,1 zu 0,01%), da dieser durch den früheren Inokulationszeitpunkt in der Interaktion bevorteilt wurde. Die zwei Konkurrenzsituationen, einmal zum Vorteil für *Cercospora* und einmal zum Vorteil für Mehltau, wurden auch bei 1M2C untersucht. Die Ergebnisse der Vergleichs-Analyse zwischen klassischem und modifiziertem LV-Modell sind übereinstimmend mit denen der Variante 1C2M und werden deshalb nicht erneut in einer Einzelbetrachtung dargestellt.

Die Wahl des Ratenparameters nahm auch in dieser Krankheitsreihenfolge einen großen Einfluss auf den Vorteil zu Beginn der Epidemie. Bei gleich hoher Rate wurde die Blattkrankheit zu Beginn gefördert, die den höheren Einfluss auf die andere Krankheit hatte. Im Verhältnis $\alpha_{MC} > \alpha_{CM}$ erhielt *Cercospora* die Förderung und im Verhältnis $\alpha_{MC} < \alpha_{CM}$ Mehltau. Bei unterschiedlichen Raten hatte immer die Blattkrankheit zu Epidemiebeginn Erfolg, die die höhere Rate vorweisen konnte. Dieser Vorteil am Anfang hatte tiefgreifende Folgen in der weiteren Entwicklung der Krankheiten. Denn wie schon in der Variante 1C2M zeigte sich auch bei 1M2C der Einfluss der Modell-Variante (klassische oder modifiziert). Die Krankheit, die sich zuerst etablierte, erfuhr im klassischen Ansatz nach erfolgreicher Etablierung einen Rückgang in der Befallshäufigkeit. Dies konnte zur Folge haben, dass sich das Verhältnis der Interaktionspartner annäherte oder sogar umkehrte. Eine Stabilisierung mit dem modifizierten Modell hatte somit immer Vorteile für die zu Beginn der Epidemie dominierende Krankheit und Nachteile für die schwächere Blattkrankheit, deren Kapazität durch die Modifikation zusätzlich gehemmt wurde.

Die Rolle der Rate im Vergleich der beiden Modellansätze war dabei wie zuvor auch ein entscheidender Faktor. Im klassischen Modell nahmen Kapazität und Konkurrenzkoeffizient den Haupteinfluss auf das Gleichgewicht zum Zeitpunkt $t = 100$, das sich in allen betrachteten Fällen kaum voneinander unterschied. Im Gegensatz dazu steht das modifizierte Modell, welches durch

eine Veränderung der Rate das Verhältnis der beiden Blattkrankheiten zueinander signifikant veränderte und somit Einfluss auf die Beziehung der beiden Interaktionspartner nahm.

4.5 Die Szenarien-Analyse der Befallssituation in den Interaktionsvarianten unter Annahme einer Klimaerwärmung

4.5.1 Die Variante C=M

Die erste der beiden verwendeten Ausgangssituationen (AS) der Duo-Variante C=M ist in Abbildung 43a zum besseren Vergleich erneut abgebildet (vergleiche Abschnitt 4.4.1, Versuch Mai_2012, Abb. 33e). Ihr Parametersatz (Tab. 47 und 48, Seite 113) diente in den folgenden sieben Fällen als Grundlage zur Analyse der verschiedenen Szenarien. Insgesamt wurden sechs Parameter (r_G , r_M , K_G , K_M , CO_{Solo} und MO_{Duo}) nacheinander verändert, um die möglichen Folgen der Klimaerwärmung zu untersuchen (Fall 2 bis 7). Zusätzlich wurde in Fall 1, die gleichzeitige Verwendung der Wachstumsraten beider Krankheiten aus den Felddaten analysiert (Tab. 14, Seite 68), um einen Vergleich zwischen kontrollierten Bedingungen im Labor und variablen Freilandgegebenheiten zu erhalten.

In der AS startete Mehltau mit einem etwas höheren Anfangsbefall, konnte sich auf den Versuchszuckerrüben aber nur bis zu einer maximalen Befallshäufigkeit von knapp 40 % entwickeln. Cercospora begann hingegen schwächer, entwickelte sich dann jedoch schneller als Mehltau und erreichte auch ein viel höheres Befallsniveau (ca. 90 %).

Die Verwendung der täglichen Wachstumsraten, welche aus den Felddaten berechnet wurden (Fall 1, Abb. 43b), führte dazu, dass Mehltau als erste Krankheit auftrat, schneller eine Epidemie aufbaute und eine doppelt so hohe Befallshäufigkeit erreichte wie in der AS. Cercospora benötigte unter diesen Voraussetzungen viel mehr Zeit, um sich zu entwickeln und erreichte ein Endbefallsniveau unterhalb des Niveaus, welches in der AS beschrieben wurde, aber immer noch oberhalb von Mehltau lag. Grund hierfür war die deutlich Verringerung der Wachstumsrate von Cercospora um 0,82/Tag, im Gegensatz zu Mehltau, bei dem nur eine Reduzierung um 0,13/Tag stattfand.

Die verwendeten Werte der Fälle 2 bis 7 mit ihren jeweils drei Szenarien (10, 20 und 50 %) sind in den Tabellen 80 und 81 festgehalten und werden graphisch in den Abbildungen 44a bis f dargestellt. Wie schon in Fall 1 zeigte sich ebenfalls ansatzweise ein Vorsprung in der Etablierungsphase für Mehltau, wenn die Rate von Cercospora um 50 % (Rate = 0,48/Tag) reduziert wurde (Fall 2, Abb. 44a). Dies betraf aber nur den Anfangsbereich. In der Gegenüberstellung der maximalen Befallshäufigkeit hatte Cercospora immer noch ein Plus von 25 %. Eine Minderung um 10 und 20 % zeigte im Gegensatz dazu kaum eine Veränderung der Ausgangssituation, genauso wie die einseitige

Steigerung der Rate von Mehltau (Fall 3, Abb. 44b). Mehltau begann zwar mit einem höheren Anfangsbefall, ab $t = 10$ dominierte aber Cercospora.

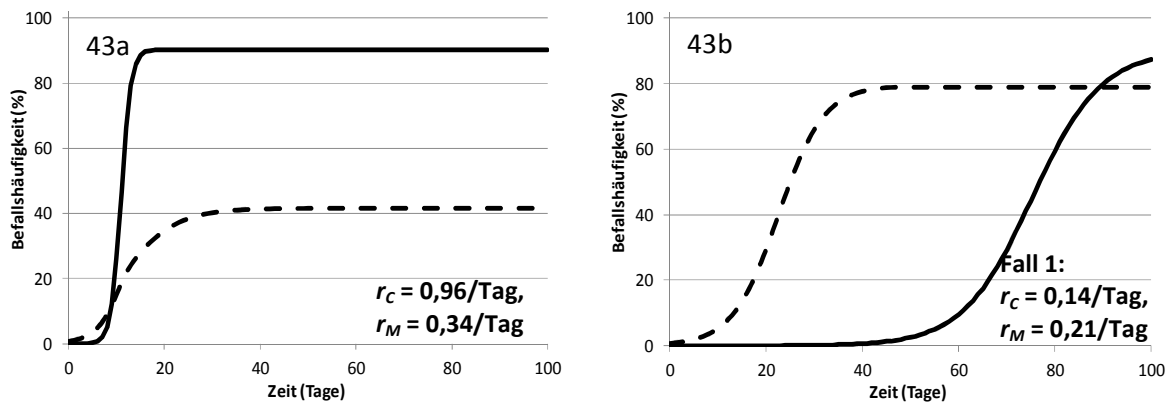


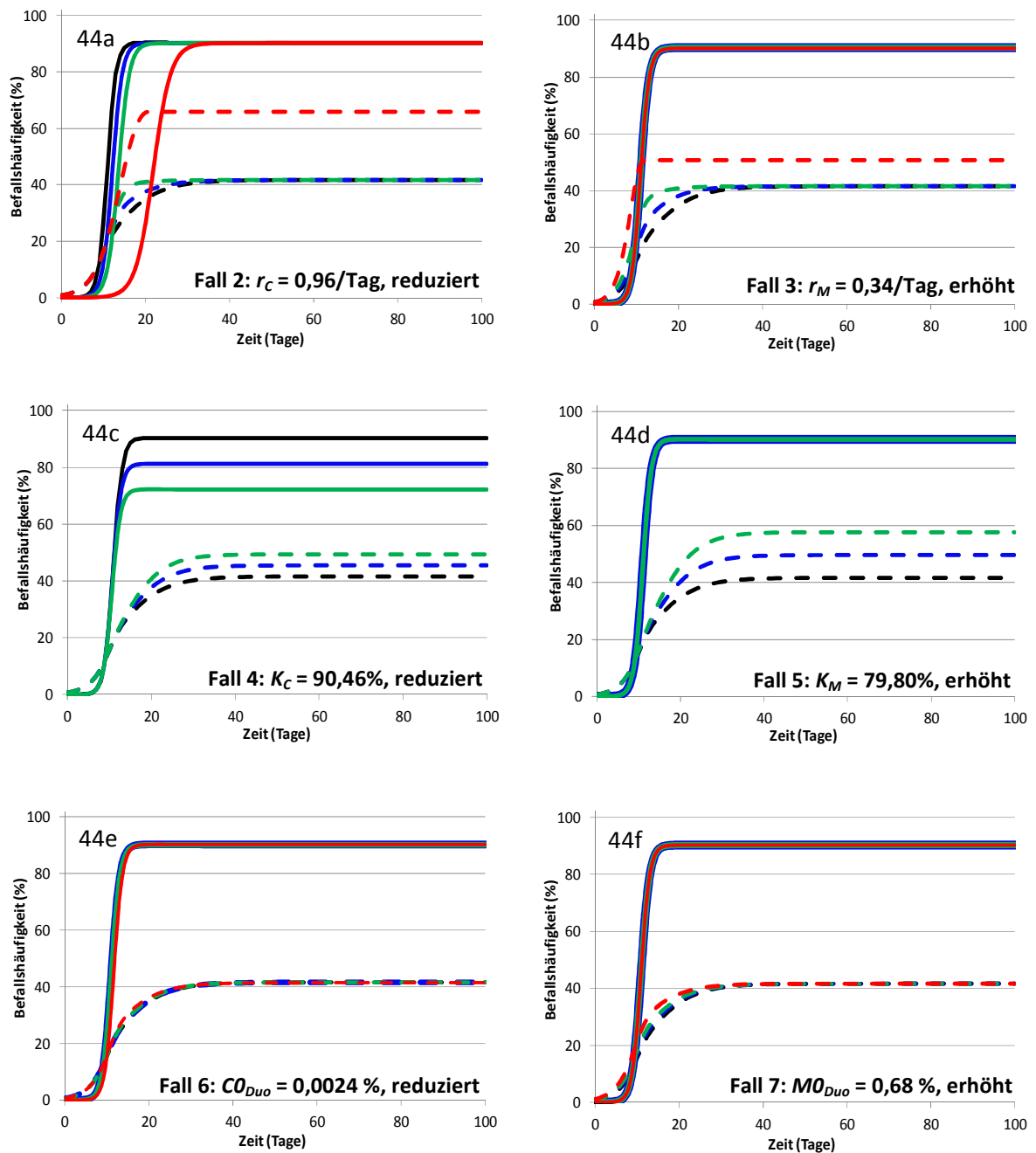
Abb. 43. **Vergleich** des Interaktionsmodells für die Variante **C=M** des **Versuchs Mai_2012** unter Verwendung der geschätzten Parameterwerte der **Klimaschrankversuche (a)** (Ausgangssituation, vergleiche Abb. 33e, Seite 112) und unter Anwendung der täglichen Raten, die von den **Felddaten (b)** stammen (vergleiche Tab. 14, Seite 68). Die Daten beruhen auf der **Befallshäufigkeit**.

Tab. 80. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **C=M** des Versuches **Mai_2012** für **Cercospora** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = 0,005$ und $\alpha_{MC} = 0,42$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

		Reduktion des Ausgangswertes			
Parameter	Ausgangswert (schwarz)	–10% (blau)	–20% (grün)	–50% (rot)	Fall/Abb.
$CO_{Solo}(\%)$	0,0024	0,0022	0,0019	0,0012	6/44e
$r_C(1/Tag)$	0,96	0,86	0,77	0,48	2/44a
$K_C(\%)$	90,46	81,41	72,37	45,23	4/44c

Tab. 81. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **C=M** des Versuches **Mai_2012** für **Mehltau** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = 0,005$ und $\alpha_{MC} = 0,42$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

		Erhöhung des Ausgangswertes			
Parameter	Ausgangswert (schwarz)	+10% (blau)	+20% (grün)	+50% (rot)	Fall/Abb.
$MO_{Duo}(\%)$	0,68	0,75	0,82	1,02	7/44f
$r_M(1/Tag)$	0,34	0,37	0,41	0,51	3/44b
$K_M(\%)$	79,80	87,78	95,77	119,70	5/44d



Legende zu (a), (c) und (e):

— C: C_AS	— C: C-10%	— C: C-20%	— C: C-50%
- - M: C_AS	- - M: C-10%	- - M: C-20%	- - M: C-50%

Legende zu (b), (d) und (f):

— C: M_AS	— C: M+10%	— C: M+20%	— C: M+50%
- - M: M_AS	- - M: M+10%	- - M: M+20%	- - M: M+50%

Abb. 44. Die Szenarien-Analyse der Variante C=M aus dem Versuch Mai_2012. Die stufenweise Veränderung der Modellparameterwerte für **Cercospora (C)** (Abb. (a), (c) und (e)) werden in Tab. 80 beschrieben und für **Mehltau (M)** (Abb. (b), (d) und (f)) in Tab. 81. Die Farbe schwarz stellt dabei immer die Ausgangssituation (AS) dar. Die Farben **blau, grün und rot** repräsentieren die untersuchten Szenarien für 10, 20 und 50 %. Bei **Cercospora** wurde eine **Reduktion** und bei **Mehltau** eine **Erhöhung** um den jeweiligen Anteil durchgeführt. „Durchgezogene Linien“ stehen für Cercospora und „gestrichelte Linien“ für Mehltau.

Bei Betrachtung der Kapazitäten konnte aufgrund der eingesetzten Grenzwerte von $K_{min} = 70 \%$ und $K_{max} = 100\%$ nur die Reduzierung bzw. Steigerung um 10 und 20 % untersucht werden (Fall 4 und 5, Abb. 44c und d). Weder bei einer Verringerung der Kapazität von Cercospora, noch bei einer Erhöhung der Kapazität von Mehltau konnte eine Veränderung des Interaktionsverhältnisses festgestellt werden. Cercospora blieb weiterhin die vorherrschende Blattkrankheit.

Die 3-stufige Erhöhung des Anfangsbefalls von Cercospora in der Variante C=M brachte keine Veränderung der Ausgangssituation (Fall 6, Abb. 44e), der perthotrophe Pilz dominiert über Mehltau im gesamten Beobachtungszeitraum. Auch die Steigerung des Anfangsbefalls von Mehltau wie in Abbildung 44f dargestellt (Fall 7), brachte keinen Wechsel des Interaktionsverhältnisses. Cercospora blieb ab $t = 19$ konstant auf einem Niveau von knapp 91 % und Mehltau erreichte ab $t = 35$ eine Befallshäufigkeit von 41 %.

Im Versuch Nov_2011_2 (Abb. 45a) gab es eine andere AS wie im Versuch Mai_2012. Für die Befallsverläufe im November lagen die geschätzten Wachstumsraten für beide Krankheiten auf einem ähnlichen Niveau (0,51 und 0,43/Tag) (Abb. 45a). Im Gegensatz dazu standen die Raten des Mai-Versuches, die sich deutlich voneinander unterschieden (0,96 und 0,34/Tag). Im Vergleich der Kapazitäten erreichte Cercospora im Mai eine höhere Befallshäufigkeit als Mehltau (90,46 zu 79,80 %). Im November war die Situation genau umgekehrt. Hier befiel Mehltau einen größeren Anteil als Cercospora (76,49 zu 97,65 %). Ein weiterer Unterschied lag bei den Konkurrenzkoeffizienten vor. Für den Einfluss von Mehltau auf Cercospora war im November-Versuch eine leichte Förderung durch ein negatives α_{CM} vorhanden. Dies war im Mai-Versuch nicht der Fall. Trotz dieser unterschiedlichen Parametersätze, war der Kurvenverlauf für beide Blattkrankheiten ähnlich. Mehltau begann mit einem geringeren Anfangsbefall und lag mit 27 % in der maximalen Befallshäufigkeit deutlich unterhalb von Cercospora mit 83 %.

Wurden anstatt der, durch die Optimierung berechneten Wachstumsraten, die festgestellten Werte der Felddaten eingesetzt (Fall 1, Abb. 45b), so nahm der Unterschied zwischen den maximalen Befallshäufigkeiten in der Interaktionsvariante ab. Mehltau steigerte seine Befallshäufigkeit auf 67 % und Cercospora steigerte sich leicht auf 92 % Befallshäufigkeit. Ursächlich war hierfür wie schon im Versuch Mai_2012 die reduzierte Wachstumsrate der Felddaten.

Varierte man in einem weiteren Schritt nicht beide Wachstumsraten gleichzeitig, sondern zunächst nur die von Cercospora (Fall 2, Abb. 46a), so zeigte sich, dass Mehltau nur einen Vorteil in der Etablierungsphase erhielt, wenn die Rate von Cercospora mindestens halbiert wurde. Diesen Vorsprung konnte der biotrophe Pilz bis zum Zeitpunkt $t = 29$ aufrechterhalten. Zu diesem Termin hatte Mehltau bereits seine maximale Befallshäufigkeit von 74 % erreicht.

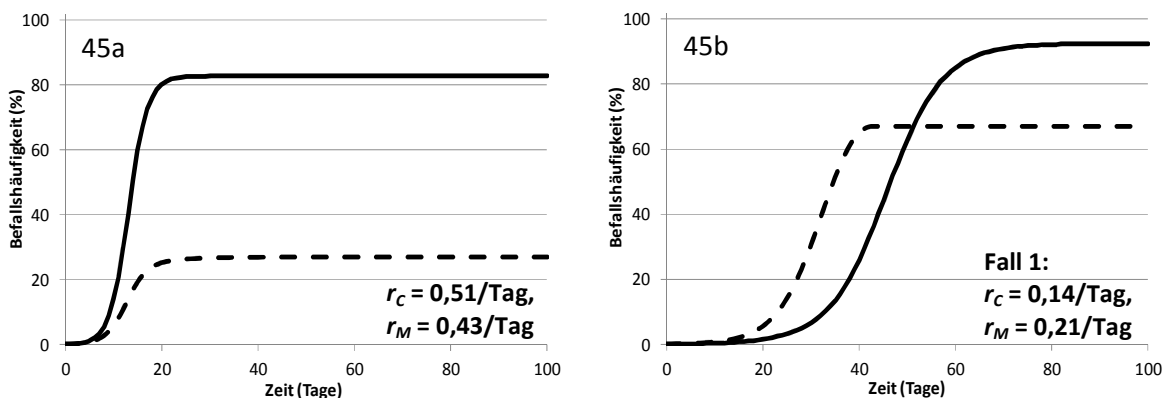


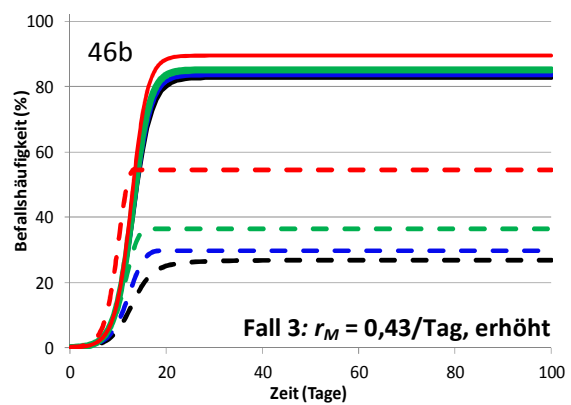
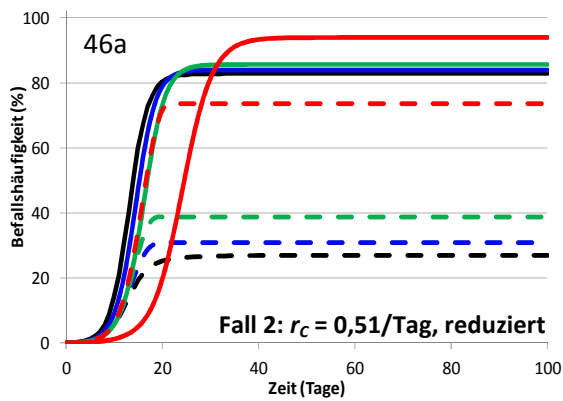
Abb. 45. **Vergleich** des Interaktionsmodells für die Variante **C=M** des **Versuchs Nov_2011** unter Verwendung der geschätzten Parameterwerte der **Klimaschrankversuche (a)** (Ausgangssituation, vergleiche Abb. 33d, Seite 112) und unter Anwendung der täglichen Raten, die von den **Felddaten (b)** stammen (vergleiche Tab. 14, Seite 68). Die Daten beruhen auf der **Befallshäufigkeit**.

Tab. 82. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **C=M** des Versuches **Nov_2011** für **Cercospora** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,24$ und $\alpha_{MC} = 0,85$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

Parameter	Ausgangswert (schwarz)	Reduktion des Ausgangswertes			Fall/Abb.
		-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	
$CO_{Solo}(\%)$	0,10	0,09	0,08	0,05	6/46e
$r_C(1/Tag)$	0,51	0,46	0,41	0,26	2/46a
$K_C(\%)$	76,49	68,84	61,19	38,25	4/46c

Tab. 83. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **C=M** des Versuches **Nov_2011** für **Mehltau** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,24$ und $\alpha_{MC} = 0,85$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

Parameter	Ausgangswert (schwarz)	Erhöhung des Ausgangswertes			Fall/Abb.
		+10% (blau)	+20% (grün)	+50% (rot)	
$MO_{Duo}(\%)$	0,09	0,10	0,11	0,14	7/46f
$r_M(1/Tag)$	0,43	0,47	0,52	0,65	3/46b
$K_M(\%)$	97,65	107,42	117,18	146,48	5/46d

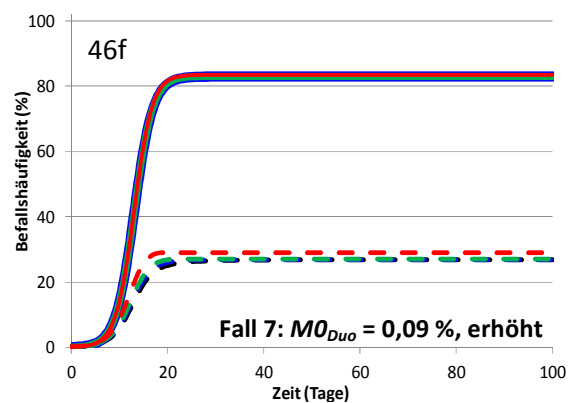
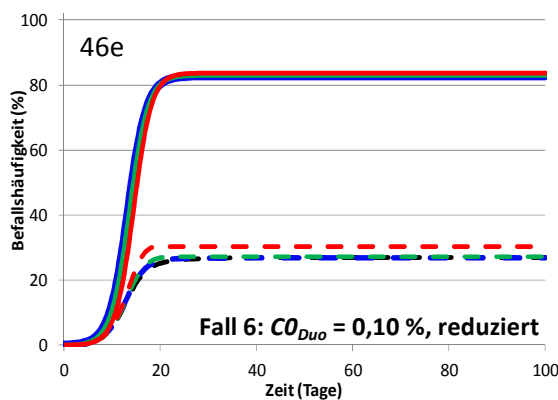


46c

Da $K_C = 76,49\%$, ist eine Reduzierung um 10 %, 20 % und 50 % bei einer $K_{min} = 70\%$ nicht mehr möglich.

46d

Da $K_M = 97,65\%$, ist eine Steigerung um 10 %, 20 % und 50 % bei einer $K_{max} = 100\%$ nicht mehr möglich.



Legende zu (a), (c) und (e):

— C: C_AS — C: C-10% — C: C-20% — C: C-50%
 — M: C_AS — M: C-10% — M: C-20% — M: C-50%

Legende zu (b), (d) und (f):

— C: M_AS — C: M+10% — C: M+20% — C: M+50%
 — M: M_AS — M: M+10% — M: M+20% — M: M+50%

Abb. 46. Die Szenarien-Analyse der Variante C=M aus dem Versuch Nov_2011. Die stufenweise Veränderung der Modellparameterwerte für **Cercospora (C)** (Abb. (a), (c) und (e)) werden in Tab. 82 beschrieben und für **Mehltau (M)** (Abb. (b), (d) und (f)) in Tab. 83. Die Farbe schwarz stellt dabei immer die Ausgangssituation (AS) dar. Die Farben **blau, grün und rot** repräsentieren die untersuchten Szenarien für 10, 20 und 50 %. Bei **Cercospora** wurde eine **Reduktion** und bei **Mehltau** eine **Erhöhung** um den jeweiligen Anteil durchgeführt. „Durchgezogene Linien“ stehen für Cercospora und „gestrichelte Linien“ für Mehltau.

Cercospora erzielte unter der Bedingung einer halbierten Wachstumsrate seine maximale Befallshäufigkeit von 94 % erst zum Zeitpunkt $t = 57$. Im Vergleich zur AS fiel für den perthotrophen Pilz zusätzlich auf, dass er anders als erwartet, trotz der Reduzierung der Rate, in allen drei Szenarien

eine höhere maximale Befallshäufigkeit erlangte. Dies wurde hervorgerufen durch den negativen Konkurrenzkoeffizienten α_{CM} , dessen Förderung in dieser Konstellation zum Tragen kam. Dieses Phänomen konnte auch bei Erhöhung der Wachstumsrate von Mehltau beobachtet werden (Fall 3, Abb. 46b). Auch in diesem Fall brachte eine Stärkung des biotrophen Pilzes eine minimale Verbesserung der Situation von Cercospora. Etwas anders sah es in dieser Situation für Mehltau aus. Er konnte sich durch Anhebung der Rate zwar in der Etablierungsphase und in der maximalen Befallshäufigkeit steigern, jedoch führte dies zu keiner Veränderung des Verhältnisses der Krankheiten zueinander.

Die Analyse der Kapazität konnte aufgrund der gesetzten Grenzwerte bei Cercospora und Mehltau für keinen Wert durchgeführt werden (Fall 4 und 5, Abb. 46c und d).

Wenn man den Parameter Anfangsbefall zu Gunsten von Mehltau veränderte (Fall 6 und 7, Abb. 46e und f), so zeigte sich, dass bei einer Reduzierung des Befalls von Cercospora als auch bei einer Steigerung des Befalls von Mehltau keine wesentliche Verbesserung der Situation von Mehltau eintrat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Mehltau in der Interaktionsvariante C=M, bei Veränderung der Wachstumsrate zu seinen Gunsten, deutlich schneller zu Beginn der Epidemie ausbreiten konnte und zu diesem Zeitpunkt auch höhere Befallshäufigkeiten erlangte. Am Ende jedoch dominierte Cercospora in allen Fällen und befiel insgesamt mehr Blätter als Mehltau. Es konnte sogar in einem der beiden Fälle (Nov_2011) eine Förderung von Cercospora beobachtet werden, obwohl eigentlich Mehltau Vorteile aus der durchgeführten Veränderung erfahren sollte. Die Beeinflussung des Anfangsbefalls zeigte bei keinem der betrachteten Szenarien einen Vorteil für Mehltau. Cercospora blieb die dominierende Blattkrankheit in dieser Variante.

4.5.2 Die Variante 1C2M

Für die Variante 1C2M wurden ebenfalls 7 Fälle für den Versuch Mai_2012 analysiert. Die eingesetzten Werte sind in den Tabellen 84 und 85 beschrieben und werden graphisch in den Abbildung 48a bis f dargestellt. Abbildung 47a zeigt den Verlauf der beiden Krankheiten in der AS. Obwohl ein unterschiedlicher Inokulationsabstand vorhanden war, begannen aufgrund der unterschiedlichen Inkubationszeiten beide Epidemien fast gleichzeitig. Dabei schaffte es Mehltau zu keinem Zeitpunkt des betrachteten Zeitraumes eine höhere Befallshäufigkeit zu erreichen als Cercospora. Nach 100 Tagen erzielte Cercospora ein Niveau von 89 % und Mehltau von 30 %. Setzte man anstatt der optimierten Raten für diesen Versuch ($r_C = 0,78/\text{Tag}$ und $r_M = 0,23/\text{Tag}$) die aus den Felddaten festgestellten Wachstumsraten ein (Fall 1, $r_C = 0,18/\text{Tag}$ und $r_M = 0,17/\text{Tag}$), so ergab sich

ein komplett anderes Bild (Abb. 47b). Das Wachstum beider Krankheiten war verzögert, insbesondere das von Cercospora. Das hatte zur Folge, dass Mehltau die erste Krankheit war, die sich etablieren konnte. Ihre maximale Befallshäufigkeit wurde zum Zeitpunkt $t = 38$ mit knapp 60 % erreicht. Cercospora kam auf insgesamt 88 %, erlangte diesen Wert aber erst zum Zeitpunkt $t = 80$.

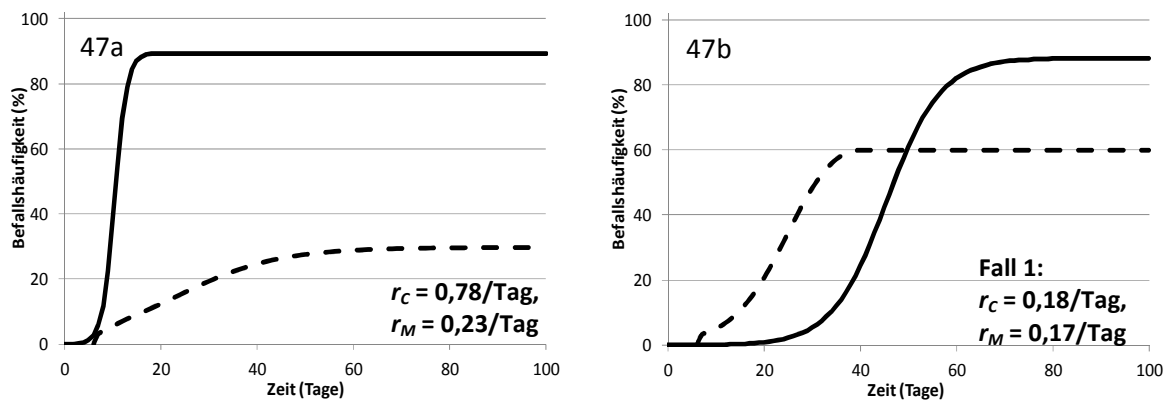


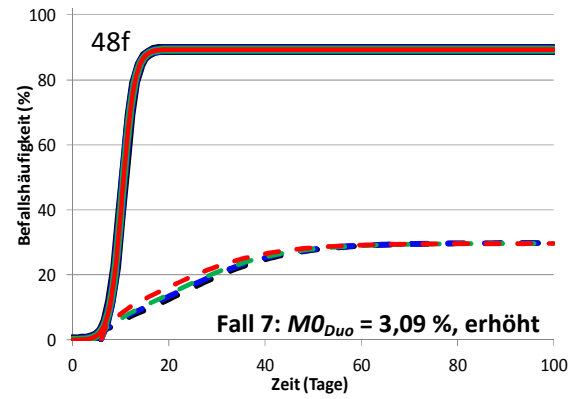
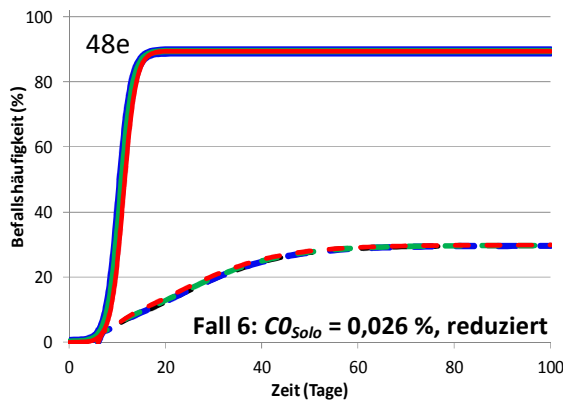
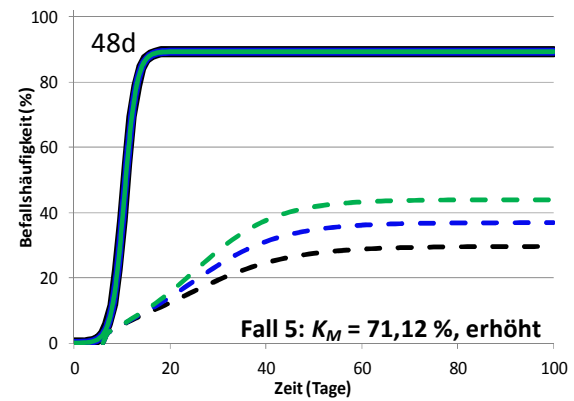
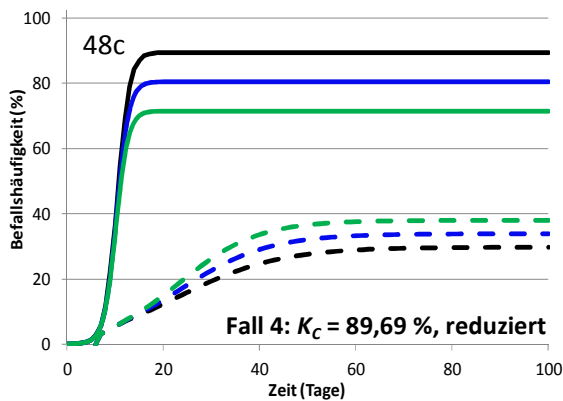
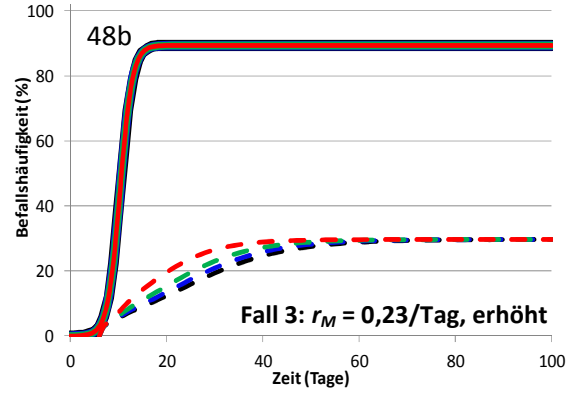
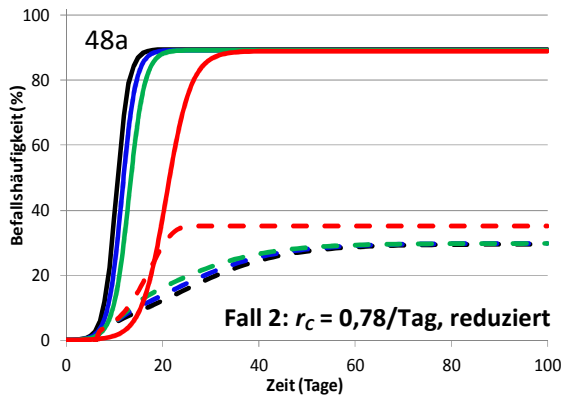
Abb. 47. **Vergleich** des Interaktionsmodells für die Variante **1C2M** des **Versuchs Mai_2012** unter Verwendung der geschätzten Parameterwerte der **Klimaschrankversuche (a)** (Ausgangssituation, vergleiche Abb. 34e, Seite 117) und unter Anwendung der täglichen Raten, die von den **Felddaten (b)** stammen (vergleiche Tab. 14, Seite 68). Die Daten beruhen auf der **Befallshäufigkeit**.

Tab. 84. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1C2M** des Versuches **Mai_2012** für **Cercospora** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = 0,02$ und $\alpha_{MC} = 0,46$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

		Reduktion des Ausgangswertes			
Parameter	Ausgangswert (schwarz)	-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	Fall/Abb.
$CO_{Solo}(\%)$	0,026	0,023	0,021	0,013	6/48e
$r_C(1/Tag)$	0,78	0,70	0,62	0,39	2/48a
$K_C(\%)$	89,69	80,72	71,75	44,85	4/48c

Tab. 85. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1C2M** des Versuches **Mai_2012** für **Mehltau** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = 0,02$ und $\alpha_{MC} = 0,46$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

		Erhöhung des Ausgangswertes			
Parameter	Ausgangswert (schwarz)	-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	Fall/Abb.
$MO_{Duo}(\%)$	3,09	3,40	3,71	4,64	7/48f
$r_M(1/Tag)$	0,23	0,25	0,28	0,35	3/48b
$K_M(\%)$	71,12	78,23	85,34	106,68	5/48d



Legende zu (a), (c) und (e):

— C: C_AS	— C: C-10%	— C: C-20%	— C: C-50%
— M: C_AS	— M: C-10%	— M: C-20%	— M: C-50%

Legende zu (b), (d) und (f):

— C: M_AS	— C: M+10%	— C: M+20%	— C: M+50%
— M: M_AS	— M: M+10%	— M: M+20%	— M: M+50%

Abb. 48. Die Szenarien-Analyse der Variante 1C2M aus dem Versuch Mai_2012. Die stufenweise Veränderung der Modellparameterwerte für **Cercospora** (C) (Abb. (a), (c) und (e)) werden in Tab. 84 beschrieben und für **Mehltau** (M) (Abb. (b), (d) und (f)) in Tab. 85. Die Farbe schwarz stellt dabei immer die Ausgangssituation (AS) dar. Die Farben **blau**, **grün** und **rot** repräsentieren die untersuchten Szenarien für 10, 20 und 50 %. Bei **Cercospora** wurde eine **Reduktion** und bei **Mehltau** eine **Erhöhung** um den jeweiligen Anteil durchgeführt. „Durchgezogene Linien“ stehen für Cercospora und „gestrichelte Linien“ für Mehltau.

Veränderte man nicht beide Wachstumsraten gleichzeitig, sondern jeweils nur eine der Raten stufenweise, so zeigte sich in den drei verschiedenen Szenarien, die für Cercospora untersucht wurden (Fall 2, Abb. 48a), dass die betrachteten Situationen keine Veränderung zu Gunsten von Mehltau mit sich brachten. Cercospora dominierte bis auf einen kleinen Anfangsbereich immer in der Befallshäufigkeit über Mehltau.

Auch die Veränderung in die andere Richtung (Erhöhung der Rate von Mehltau) (Fall 3, Abb. 48b) brachte Mehltau keinen Vorteil. Die Beziehung der Blattkrankheiten blieb unverändert.

Bei der einseitigen Variation der Kapazität konnten für Cercospora und Mehltau jeweils nur die Fälle für 10 und 20 % betrachtet werden (Fall 4 und 5, Abb. 48c und d). Reduzierte man die Kapazität von Cercospora, so zeigten sich nur geringe Annäherungen der Kurven der beiden Blattkrankheiten. Von einer Differenz mit ca. 60 % Befallshäufigkeit in der AS sank die Differenz auf 33 % bei Betrachtung der Stufe -20 % ab. In der Situation der Kapazitätserhöhung für Mehltau verringerte sich die Differenz auf 45 %.

Untersucht man den Einfluss des Anfangsbefalls in der Szenarien-Analyse der Klimaerwärmung, so zeigte sich bei einem reduzierten Anfangsbefall von Cercospora wie auch bei der Erhöhung von Mehltau keine Veränderung der Situation. Cercospora dominierte über Mehltau (Fall 6 und 7, Abb. 48e und f).

Der zweite Versuch, der für die Variante 1C2M in der Szenarien-Analyse eingesetzt wurde, war das November-Experiment (Abb. 49a). Dieser Versuch unterschied sich vom Mai-Versuch durch unterschiedliche Wachstumsraten. Im Mai lagen die Raten bei 0,78/Tag für Cercospora und bei 0,23/Tag für Mehltau. Im November wiesen die beiden Krankheiten mit 0,57/Tag für Cercospora und 0,50/Tag für Mehltau einen geringeren Unterschied zwischen den Raten auf. Bei den Kapazitäten war das Verhältnis der beiden Krankheiten in den beiden Versuchen jeweils umgekehrt. Im Mai erreichte Cercospora ein Niveau von 89,69 % und Mehltau von 71,12 %, im November hingegen hatte Cercospora die geringere Kapazität mit 76,86 % und Mehltau die höhere mit 97,05 %. Obwohl diese Unterschiede vorhanden waren, zeigte sich in der AS (Abb. 49a) ein ähnlicher Verlauf der Befallshäufigkeiten wie zuvor im Mai-Versuch. Beide Krankheiten begannen fast gleichzeitig, wobei Cercospora von Anfang bis Ende in der Befallshäufigkeit über Mehltau dominierte. Auch die Verwendung der täglichen Wachstumsraten aus den Felddaten (Fall 1) änderte an der Situation im Vergleich zu Mai_2012 wenig (Abb. 49b). Bis zum Zeitpunkt $t = 48$ der Epidemie hatte Mehltau einen Vorsprung in der Entwicklung, danach übernahm Cercospora die Führung in der Interaktions-Variante und dominierte mit 79 % Befallshäufigkeit über Mehltau mit 60 %.

Bei Veränderung der Wachstumsrate für *Cercospora* zeigte sich, dass bei einer Rate von 0,29/Tage (–50 %) Mehltau über den gesamten Untersuchungszeitraum in der Befallshäufigkeit den ersten Rang einnahm (Fall 2, Abb. 50a). In dieser Situation wurde ein maximales Niveau von 82 % erzielt. *Cercospora* erlangte einen Wert von 80 % Befallshäufigkeit und lag damit knapp unterhalb von Mehltau. Der Fall 3, welcher ausschließlich die Rate von Mehltau betraf, hatte zur Folge, dass der Verlauf von *Cercospora* in allen betrachteten Fällen kaum verändert wurde. Dies zeigte sich in der Abbildung 50b durch die Überlagerung der drei Kurven. Mehltau hingegen variierte leicht im Befallsverlauf der drei betrachteten Szenarien, jedoch konnte keine der untersuchten Situationen eine höhere Befallshäufigkeit im Vergleich zu *Cercospora* aufweisen.

Eine einseitige Reduzierung der Kapazität für *Cercospora* (Falle 4), wie auch eine einseitige Erhöhung der Kapazität von Mehltau (Fall 5) konnte aufgrund der gesetzten Grenzwerte nicht durchgeführt werden.

Bei der Variation des Anfangsbefalls von *Cercospora* und von Mehltau gab es, wie schon im Mai-Versuch, keinen Vorteil für den biotrophen Pilz (Fall 6 und 7, Abb. 50e und f). Eine Veränderung des Klimas, die eine Erhöhung oder Minderung des Anfangsbefalls zur Folge haben könnte, zeigte in dieser Analyse keinen Einfluss auf die Beziehung der Blattkrankheiten untereinander.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass, wie schon bei der Variante C=M, *Cercospora* in der Interaktion über Mehltau dominierte. Dieses Resultat zeigten beide Versuchsreihen einheitlich. Es gab nur eine Situation (Reduktion der Wachstumsrate von *Cercospora*), in der Mehltau *Cercospora* in der Anzahl der befallenen Blätter zu Beginn der Epidemie übertraf und bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes leicht dominierte bzw. auf einem Befallshäufigkeitsniveau mit *Cercospora* lag. Hierfür war aber eine deutliche Reduzierung der Wachstumsrate von *Cercospora* notwendig (–50 %). Veränderungen der Parameter auf der Seite von Mehltau (Wachstumsrate, Kapazität und Anfangsbefall) waren dagegen weniger effektiv und brachten gegenüber *Cercospora* keinen Erfolg in der Interaktion.

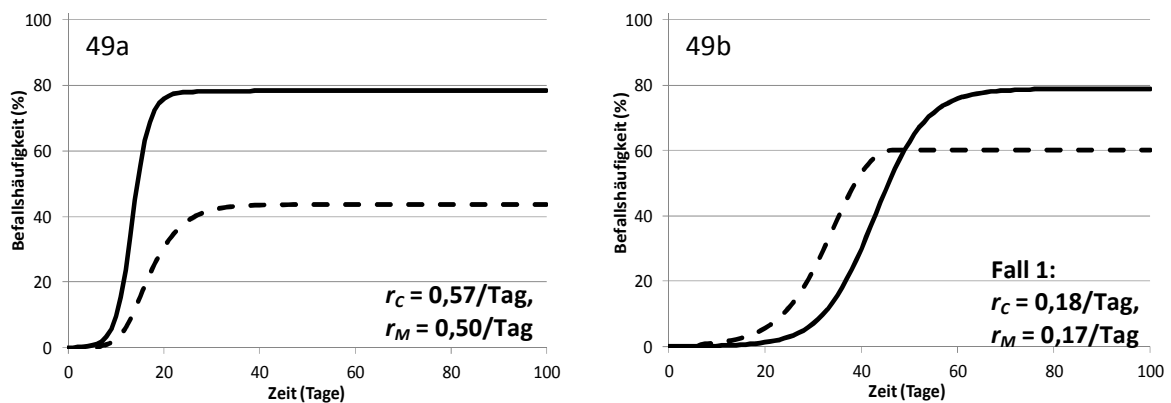


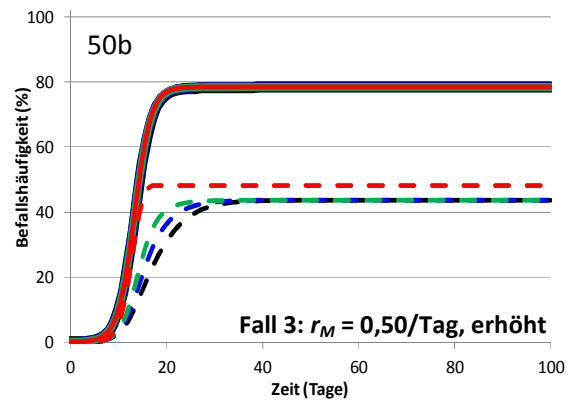
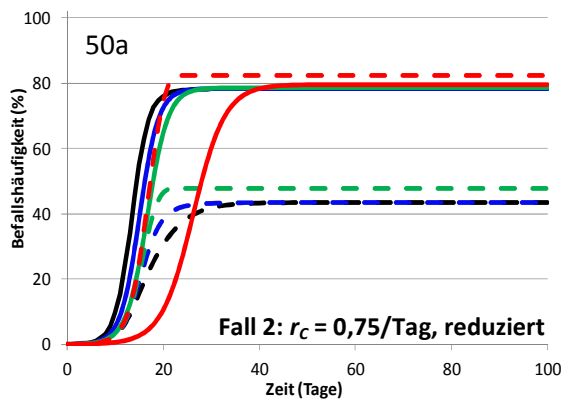
Abb. 49. **Vergleich** des Interaktionsmodells für die Variante **1C2M** des **Versuchs Nov_2011** unter Verwendung der geschätzten Parameterwerte der **Klimaschrankversuche (a)** (Ausgangssituation, vergleiche Abb. 34c, Seite 117) und unter Anwendung der täglichen Raten, die von den **Felddaten (b)** stammen (vergleiche Tab. 14, Seite 68). Die Daten beruhen auf der **Befallshäufigkeit**.

Tab. 86. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1C2M** des Versuches **Nov_2011** für **Cercospora** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,03$ und $\alpha_{MC} = 0,68$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

Parameter	Ausgangswert (schwarz)	Reduktion des Ausgangswertes			Fall/Abb.
		-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	
$CO_{Solo}(\%)$	0,03	0,027	0,024	0,015	6/50e
$r_c(1/Tag)$	0,57	0,51	0,46	0,29	2/50a
$K_c(\%)$	76,86	69,17	61,49	38,43	4/50c

Tab. 87. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1C2M** des Versuches **Nov_2011** für **Mehltau** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,03$ und $\alpha_{MC} = 0,68$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

Parameter	Ausgangswert (schwarz)	Erhöhung des Ausgangswertes			Fall/Abb.
		-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	
$MO_{Duo}(\%)$	0,64	0,70	0,77	0,96	7/50f
$r_M(1/Tag)$	0,50	0,55	0,60	0,75	3/50b
$K_M(\%)$	97,05	106,76	116,46	145,58	5/50d

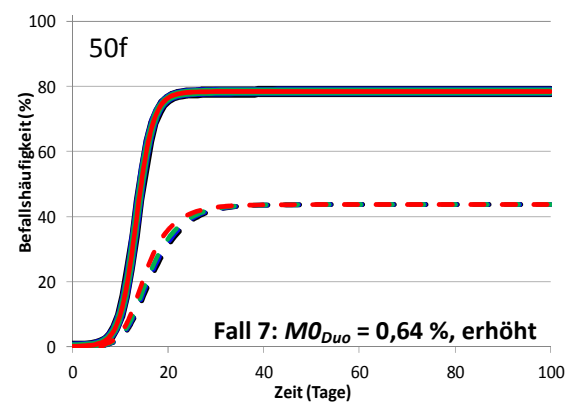
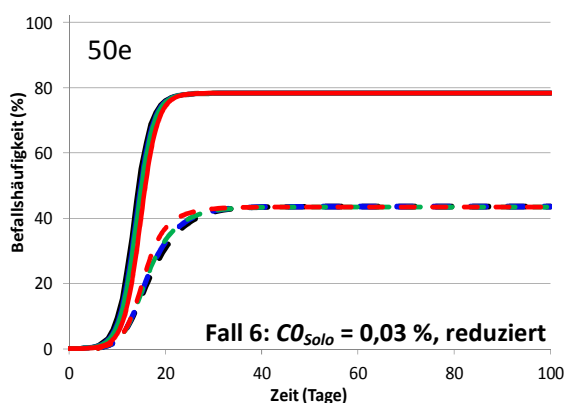


50c

Da $K_C = 76,86\%$, ist eine Reduzierung um 10 %, 20 % und 50 % bei einer $K_{min} = 70\%$ nicht mehr möglich.

50d

Da $K_M = 97,05\%$, ist eine Steigerung um 10 %, 20 % und 50 % bei einer $K_{max} = 100\%$ nicht mehr möglich.



Legende zu (a), (c) und (e):

— C: C_AS	— C: C-10%	— C: C-20%	— C: C-50%
— M: C_AS	— M: C-10%	— M: C-20%	— M: C-50%

Legende zu (b), (d) und (f):

— C: M_AS	— C: M+10%	— C: M+20%	— C: M+50%
— M: M_AS	— M: M+10%	— M: M+20%	— M: M+50%

Abb. 50. Die Szenarien-Analyse der Variante 1C2M aus dem Versuch Nov_2011. Die stufenweise Veränderung der Modellparameterwerte für **Cercospora** (C) (Abb. (a), (c) und (e)) werden in Tab. 86 beschrieben und für **Mehltau** (M) (Abb. (b), (d) und (f)) in Tab. 87. Die Farbe schwarz stellt dabei immer die Ausgangssituation (AS) dar. Die Farben **blau**, **grün** und **rot** repräsentieren die untersuchten Szenarien für 10, 20 und 50 %. Bei **Cercospora** wurde eine **Reduktion** und bei **Mehltau** eine **Erhöhung** um den jeweiligen Anteil durchgeführt. „Durchgezogene Linien“ stehen für **Cercospora** und „gestrichelte Linien“ für **Mehltau**.

4.5.3 Die Variante 1M2C

Unter der Inokulationsreihenfolge 1M2C zeigte Mehltau zum ersten Mal, im Vergleich zu den vier vorher beschriebenen AS, eine Überlegenheit von der Inokulation bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes gegenüber Cercospora (Abb. 51a). Demzufolge wurde, anders als in den zuvor beschriebenen Varianten, für Cercospora eine Erhöhung der Parameter untersucht und für Mehltau eine Verringerung.

Eine Verwendung der Wachstumsraten aus der Felddatenanalyse (Fall 1, Abb. 51b) führte zu keiner Veränderung der Beziehung der Krankheiten zueinander. In diesem Fall verzögerte sich die Epidemie von Cercospora zudem deutlich, da das Erreichen der maximale Befallshäufigkeit von $t = 23$ in der AS auf einen Zeitpunkt außerhalb des Betrachtungszeitraumes verlagert wurde ($t > 100$ in Szenario 51b). Grund hierfür war die erhebliche Reduktion der Rate von 0,91 auf 0,14/Tag für Cercospora.

Eine Erhöhung der Wachstumsrate von Cercospora war aufgrund der schon vorhandenen hohen Rate (0,9/Tag) nur für zwei der drei Stufen möglich (Fall 2). Die betrachtete Erhöhung brachte keine nennenswerte Veränderung des Interaktionsverhältnisses. In der einseitigen und stufenweisen Reduzierung der Wachstumsrate von Mehltau setzte sich die Dominanz von Mehltau fort (Fall 3, Abb. 52b). Die Kurven für Mehltau verliefen auf einem höheren Niveau als für Cercospora. Die maximale Befallshäufigkeit des perthotrophen Pilzes verbesserte sich trotz abnehmender Rate von Mehltau nur minimal. Alle untersuchten Fälle führten erneut zu einer Dominanz von Mehltau über Cercospora.

Der Fall 4 (Abb. 52c), welcher die Veränderung der Kapazität von Cercospora beschreibt, zeigte bei Erhöhung der Kapazität von Cercospora um 10 % eine gleichbleibende Situation für Mehltau. Cercospora konnte in dieser Situation deutlich gegenüber Mehltau aufholen und näherte sich dem Kapazitätsniveau von Mehltau an. In der AS entsprach die Differenz 8 %, im Szenario +10 % hatten beiden den gleichen Befallswert vorzuweisen. Im umgekehrten Fall (Reduzierung der Kapazität von Mehltau, Fall 5) blieb der Kurvenverlauf für Cercospora fast unverändert (Abb. 52d). Mehltau hingegen erreichte bei einem Minus von 20 % nur noch eine Kapazität von 78 % und war damit schwächer als Cercospora mit ca. 88 % Befallshäufigkeit.

Bei der Variation des Anfangsbefalls zeigten sich weder bei der Erhöhung des Befalls von Cercospora noch bei der Verringerung des Befalls von Mehltau eine Veränderung der Interaktion (Fall 6 und 7, Abb. 52e und f).

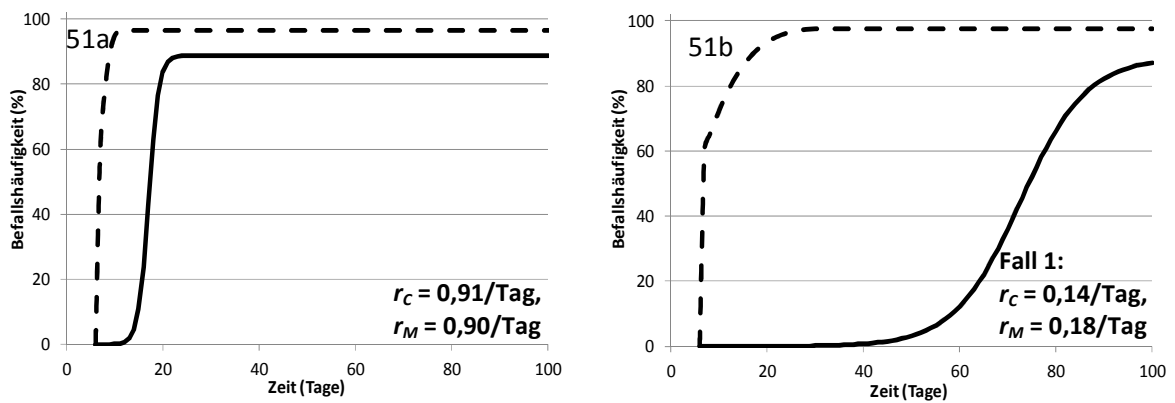


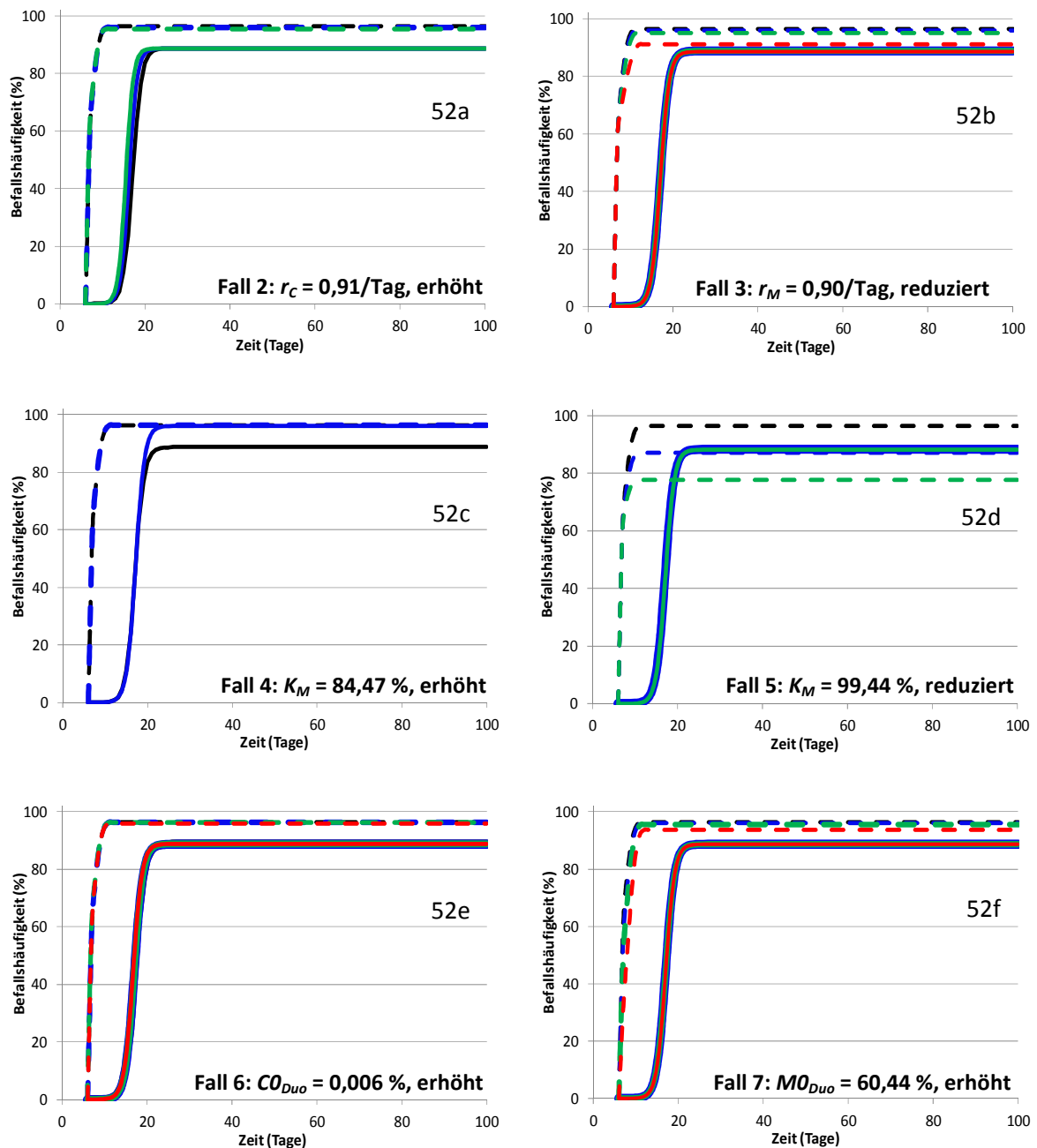
Abb. 51. **Vergleich** des Interaktionsmodells für die Variante **1M2C** des **Versuchs Mai_2012** unter Verwendung der geschätzten Parameterwerte der **Klimaschrankversuche (a)** (Ausgangssituation, vergleiche Abb. 35e, Seite 120) und unter Anwendung der täglichen Raten, die von den **Felddaten (b)** stammen (vergleiche Tab. 14, Seite 68). Die Daten beruhen auf der **Befallshäufigkeit**.

Tab. 88. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1M2C** des Versuches **Mai_2012** für **Cercospora** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,03$ und $\alpha_{MC} = 9,83$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

Parameter	Ausgangswert (schwarz)	Erhöhung des Ausgangswertes			Fall/Abb.
		+10% (blau)	+20% (grün)	+50% (rot)	
$CO_{Solo}(\%)$	0,006	0,0066	0,0072	0,009	6/52e
$r_C(1/Tag)$	0,91	1,00	1,09	1,37	2/52a
$K_C(\%)$	84,47	92,92	101,36	126,71	4/52c

Tab. 89. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1M2C** des Versuches **Mai_2012** für **Mehltau** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,03$ und $\alpha_{MC} = 9,83$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

Parameter	Ausgangswert (schwarz)	Reduktion des Ausgangswertes			Fall/Abb.
		-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	
$MO_{Duo}(\%)$	60,44	54,40	48,35	30,22	7/52f
$r_M(1/Tag)$	0,90	0,81	0,72	0,45	3/52b
$K_M(\%)$	99,44	89,50	79,55	49,72	5/52d



Legende zu (a), (c) und (e):

— C: C_AS	— C: C+10%	— C: C+20%	— C: C+50%
— M: C_AS	— M: C+10%	— M: C+20%	— M: C+50%

Legende zu (b), (d) und (f):

— C: M_AS	— C: M-10%	— C: M-20%	— C: M-50%
— M: M_AS	— M: M-10%	— M: M-20%	— M: M-50%

Abb. 52. Die Szenarien-Analyse der Variante 1M2C aus dem Versuch Mai_2012. Die stufenweise Veränderung der Modellparameterwerte für **Cercospora (C)** (Abb. (a), (c) und (e)) werden in Tab. 88 beschrieben und für **Mehltau (M)** (Abb. (b), (d) und (f)) in Tab. 89. Die Farbe schwarz stellt dabei immer die Ausgangssituation (AS) dar. Die Farben **blau, grün und rot** repräsentieren die untersuchten Szenarien für **10, 20 und 50 %**. Bei **Cercospora** wurde eine **Erhöhung** und bei **Mehltau** eine **Reduktion** um den jeweiligen Anteil durchgeführt. „Durchgezogene Linien“ stehen für **Cercospora** und „gestrichelte Linien“ für **Mehltau**.

Der zweite Versuch der Variante 1M2C, der untersucht wurde, unterschied sich vom ersten Experiment im Verhältnis der beiden Blattkrankheiten zueinander. Im November-Versuch der Variante 1M2C fand nämlich ein Wechsel der dominierenden Blattkrankheit statt. Dies war zuvor bei keiner anderen Kombinationsvariante so ausgeprägt vorhanden. In der AS (Abb. 53a) dominierte Mehltau bis zum Zeitpunkt $t = 19$ und erreichte ein Maximum mit 46 % Befallshäufigkeit. Ab $t = 19$ übernahm *Cercospora* die führende Rolle und befiel insgesamt 85 % der Blätter. Die Blattflecken-Krankheit übertraf damit Mehltau um 39 %.

Beim Einsatz der täglichen Wachstumsraten aus den Felddaten (Fall 1, Abb. 53b) veränderte sich die Situation im Vergleich zur AS. Mehltau lag bis zum Termin $t = 52$ in der erreichten Befallshäufigkeit vorne. Danach wuchs *Cercospora* bis $t = 78$ an und erreichte ihr Endbefallsniveau, welches mit 88 % um 28 % höher lag als das von Mehltau.

Fall 2, der die einseitige Veränderung der Wachstumsrate von *Cercospora* beschreibt, fasst die gesamte Bandbreite der Situationen zusammen, die bereits in der Ausgangssituation und unter Verwendung der im Feld festgestellten Raten beobachtet wurden (Abb. 54a). Eine Reduzierung der Wachstumsrate um die Hälfte ermöglichte Mehltau auf der einen Seite einen enormen Vorsprung in der Anfangsphase und auf der anderen Seite eine Angleichung der maximalen Befallshäufigkeit der beiden Blattkrankheiten mit Vorteilen für *Cercospora*. Der umgekehrte Fall (variable Wachstumsrate für Mehltau, Fall 3) zeigte auch bei einer Steigerung der Rate um 50 % keine so beachtliche Verbesserung von Mehltau wie zuvor bei der Modifikation der Rate von *Cercospora* (Abb. 54b). Der Vorsprung zu Beginn der Epidemie blieb für Mehltau vorhanden, am Ende dominierte jedoch in allen drei Fällen *Cercospora*. Ein fördernder Effekt wie in der Variante C=M (Nov_2011, Abb. 46a und b, Seite 156) wurde durch den negativen Konkurrenzkoefizienten α_{CM} nicht festgestellt, da seine Wirkung durch einen sehr geringen Wert (0,03) nicht zum Tragen kam.

Die Veränderung der Kapazität bei *Cercospora* und bei Mehltau konnte aufgrund der verwendeten Grenzwerte für K_{min} und K_{max} nicht durchgeführt werden (Fall 4 und 5).

Die stufenweise Variation des Anfangsbefalls von *Cercospora*, aber auch von Mehltau führte in keinem der sechs betrachteten Szenarien zu einem Wechsel des Interaktionsverhältnisses (Fall 6 und 7, Abb. 54e und f). Mehltau behielt den Vorsprung in der Anfangsphase der Epidemie, jedoch übernahm *Cercospora* spätestens ab $t = 20$ die Position der bevorteilten Blattkrankheit und dominierte ab diesem Zeitpunkt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Mehltau in beiden Versuchen zu Beginn der Epidemie immer höhere Befallshäufigkeiten erreichte als dies für *Cercospora* der Fall war. Betrachtete man den gesamten Versuchszeitraum, so konnte sich Mehltau nur im Mai-Versuch im überwiegenden Teil der Fälle gegenüber *Cercospora* behaupten. Im November-Versuch dominierte in der maximalen

Befallshäufigkeit meistens *Cercospora*. Ein ähnliches maximales Befallsniveau für Mehltau war in dieser Versuchsreihe nur zu erreichen, wenn *Cercospora* eine deutliche Reduktion (mindestens Halbierung) der Wachstumsrate erfuhr.

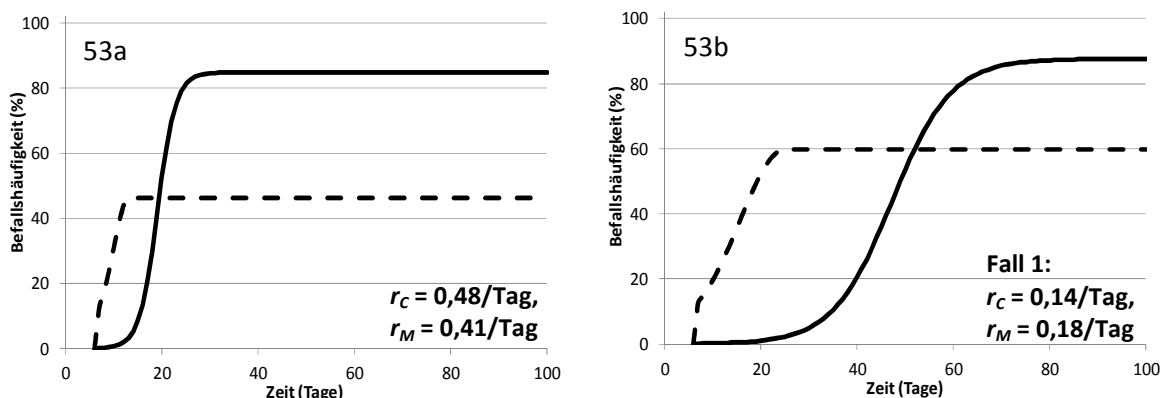


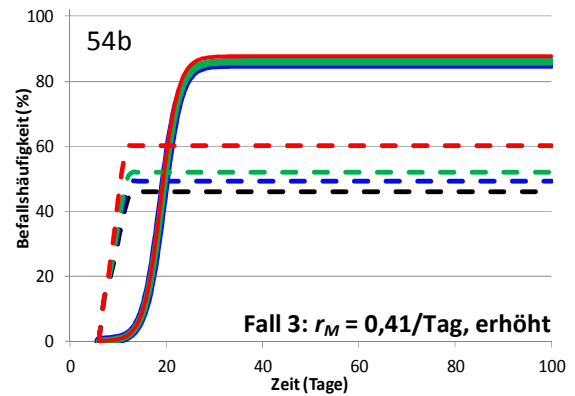
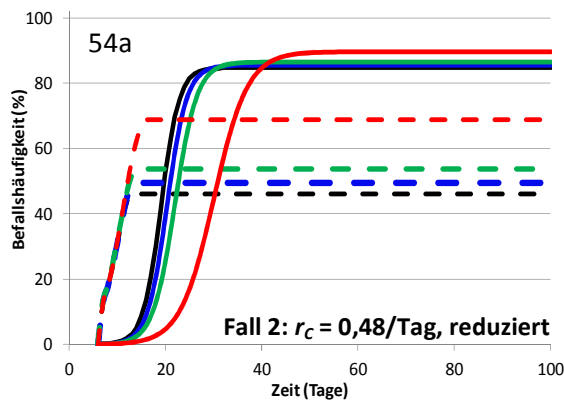
Abb. 53. **Vergleich** des Interaktionsmodells für die Variante **1M2C** des Versuchs **Nov_2011** unter Verwendung der geschätzten Parameterwerte der **Klimaschrankversuche (a)** (Ausgangssituation, vergleiche Abb. 35c, Seite 120) und unter Anwendung der täglichen Raten, die von den **Felddaten (b)** stammen (vergleiche Tab. 14, Seite 68). Die Daten beruhen auf der **Befallshäufigkeit**.

Tab. 90. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1M2C** des Versuches **Nov_2011** für ***Cercospora*** mit den Konkurrenzkoeffizienten $\alpha_{CM} = -0,21$ und $\alpha_{MC} = 16,62$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

		Reduktion des Ausgangswertes			
Parameter	Ausgangswert (schwarz)	-10% (blau)	-20% (grün)	-50% (rot)	Fall/Abb.
$CO_{Solo}(\%)$	0,14	0,13	0,11	0,07	6/54e
$r_C(1/Tag)$	0,48	0,43	0,38	0,24	2/54a
$K_C(\%)$	75,21	67,69	60,17	37,61	4/54c

Tab. 91. Die untersuchten Fälle der Szenarien-Analyse für die Variante **1M2C** des Versuches **Nov_2011** für **Mehltau** $\alpha_{CM} = -0,21$ und $\alpha_{MC} = 16,62$. Die mit grauer Farbe hinterlegten Felder wurden aufgrund der Überschreitung des festgelegten Grenzbereiches graphisch nicht dargestellt.

		Erhöhung des Ausgangswertes			
Parameter	Ausgangswert (schwarz)	+10% (blau)	+20% (grün)	+50% (rot)	Fall/Abb.
$MO_{Duo}(\%)$	12,62	13,88	15,14	18,93	7/54f
$r_M(1/Tag)$	0,41	0,45	0,49	0,62	3/54b
$K_M(\%)$	97,81	107,59	117,37	146,72	5/54d

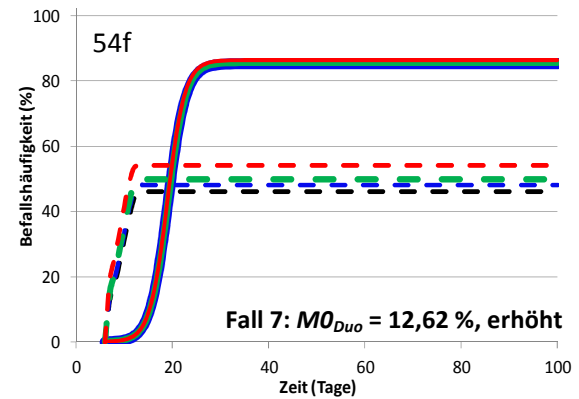
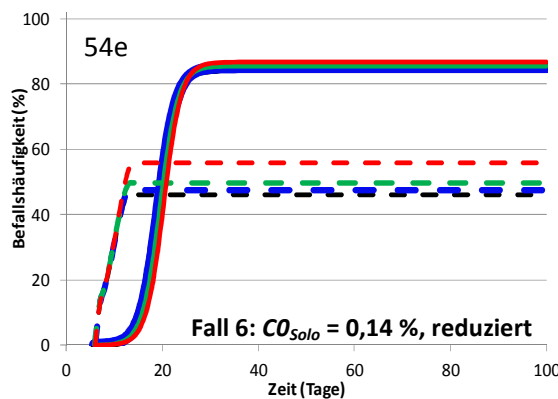


54c

Da $K_C = 75,21\%$, ist eine Reduzierung um 10 %, 20 % und 50 % bei einer $K_{min} = 70\%$ nicht mehr möglich.

54d

Da $K_M = 97,81\%$, ist eine Erhöhung um 10 %, 20 % und 50 % bei einer $K_{max} = 100\%$ nicht mehr möglich.



Legende zu (a), (c) und (e):

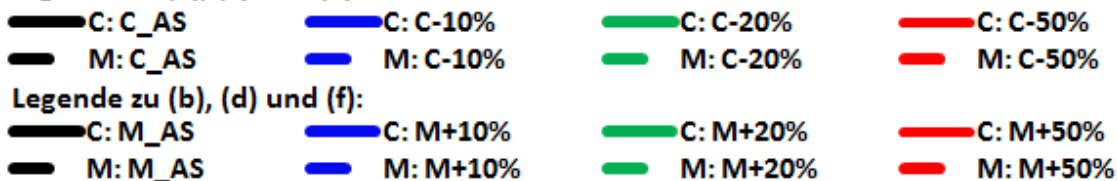


Abb. 54. Die Szenarien-Analyse der Variante 1M2C aus dem Versuch Nov_2011. Die stufenweise Veränderung der Eingabeparameterwerte für **Cercospora** (C) (Abb. (a), (c) und (e)) werden in Tab. 90 beschrieben und für **Mehltau** (M) (Abb. (b), (d) und (f)) in Tab. 91. Die Farbe schwarz stellt dabei immer die Ausgangssituation (AS) dar. Die Farben **blau, grün und rot** repräsentieren die untersuchten Szenarien für 10, 20 und 50 %. Bei **Cercospora** wurde eine **Reduktion** und bei **Mehltau** eine **Erhöhung** um den jeweiligen Anteil durchgeführt. „Durchgezogene Linien“ stehen für **Cercospora** und „gestrichelte Linien“ für **Mehltau**.

4.5.4 Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien-Analyse

Die Ergebnisse der Szenarien-Analyse der Varianten C=M, 1C2M und 1M2C aus den Kapiteln 4.5.1 bis 4.5.3 werden in diesem Abschnitt zusammengefasst. Die Ausgangssituation der Interaktion in den Varianten C=M und 1C2M zeigte die Dominanz von Cercospora über Mehltau auf. Die Verwendung der Wachstumsraten aus den Felderhebungen ergab, dass variable Umweltbedingungen Vorteile für Mehltau, insbesondere in der Etablierungsphase bedeuteten. Diese Beobachtung wurde auch durch die einseitige Veränderung der Situation zu Gunsten von Mehltau bestätigt. Durch die Reduzierung des Parameters Wachstumsrate von Cercospora ergab sich in drei der vier Versuche ein zeitlicher Vorsprung gegenüber dem perthotropen Pilz in der Besiedlung der Zuckerrübe. Die maximale Befallshäufigkeit von Mehltau erreichte nur in einem Fall ein etwas höheres Niveau als von Cercospora. Auch in diesem Fall wurde die Veränderung der Beziehung der beiden Blattkrankheiten zueinander durch die Verringerung der Wachstumsrate von Cercospora verursacht (Nov_2011). Der biotrophe Pilz konnte demzufolge aus eigener Kraft seine Lage nicht verbessern. Es musste immer eine Schwächung von Cercospora vorhanden sein, damit eine Chance für Mehltau auftrat.

Besaß Mehltau einen Vorsprung in der Besiedlung, wie im November-Versuch der Variante 1M2C, so führte keines der untersuchten Szenarien zu einer höheren maximalen Befallshäufigkeit für Mehltau im Vergleich zu Cercospora.

Im einzigen Fall, in dem Cercospora über den gesamten Beobachtungszeitpunkt die schlechtere Position in der Interaktion aufwies (1M2C, Mai_2012), konnte der perthotrophe Pilz nur über die maximale Befallshäufigkeit Vorteile gegenüber Mehltau erzielen. Dies betraf den Fall einer reduzierten Kapazität von Mehltau. Einen zeitlichen Vorsprung, wie er bei Mehltau beobachtet wurde, erreichte Cercospora nie.

In der Variante C=M (Versuch Nov_2011) konnte aufgrund eines negativen Konkurrenzcoeffizienten (α_{CM}) in zwei der sieben Fälle sogar eine leichte Förderung von Cercospora beobachtet werden, die sich auf die maximale Befallshäufigkeit positiv auswirkte.

Die jeweils 3-stufige Veränderung (10, 20 und 50%) der drei Parameter (MO_{Duo} oder CO_{Solo} sowie r und K) machte zudem deutlich, dass in allen Fällen eine Veränderung des Wertes um mindestens die Hälfte vorhanden sein musste, um überhaupt einen Wechsel der Beziehung der beiden Blattkrankheiten zueinander zu erzielen. Ansonsten trat keine Verschiebung im Interaktionsverhältnis von Cercospora und Mehltau ein.

4.5.5 Betrachtung der Pilzentwicklung unter der Annahme einer Klimaerwärmung und Verknüpfung der Erkenntnis mit den Ergebnissen der Szenarien-Analyse

Wie schon im ersten Teil dieser Arbeit berichtet (Kapitel 2.7), liegt die derzeitige mittlere Jahrestemperatur in Deutschland bei 8,3 °C (1891 bis 2010) (DWD, 2012). Fokussiert man den Beobachtungszeitraum auf die wichtigen Monate für die Zuckerrüben-Blattkrankheiten (Juni bis September), so liegt die Temperatur im Grenzbereich zwischen 9,08 und 21,99 °C (Tab. 92). Bei Addition der maximal möglichen Temperaturerhöhung von 3,5 °C, die bis 2100 simuliert wurde (ANONYMUS, 2008), könnte es zu einer Verschiebung des Temperaturintervalls auf 12,58 bis 25,49 °C kommen.

Die in Abbildung 1 (Seite 20) dargestellte optimale Gesamtentwicklung von Cercospora, Mehltau und Rost wurde für alle drei Blattkrankheiten in jeweils eine Kurve der relativen Infektionswahrscheinlichkeit (90 bis 100 %) übersetzt (Abb. 55). Der Vergleich der drei Krankheiten zeigte, dass Mehltau einen größeren Bereich abdeckte als Rost und Cercospora, wobei Rost im niedrigen Temperaturbereich bessere Entwicklungschancen vorweisen konnte und Cercospora in der oberen Region die erfolgreichste Blattkrankheit war.

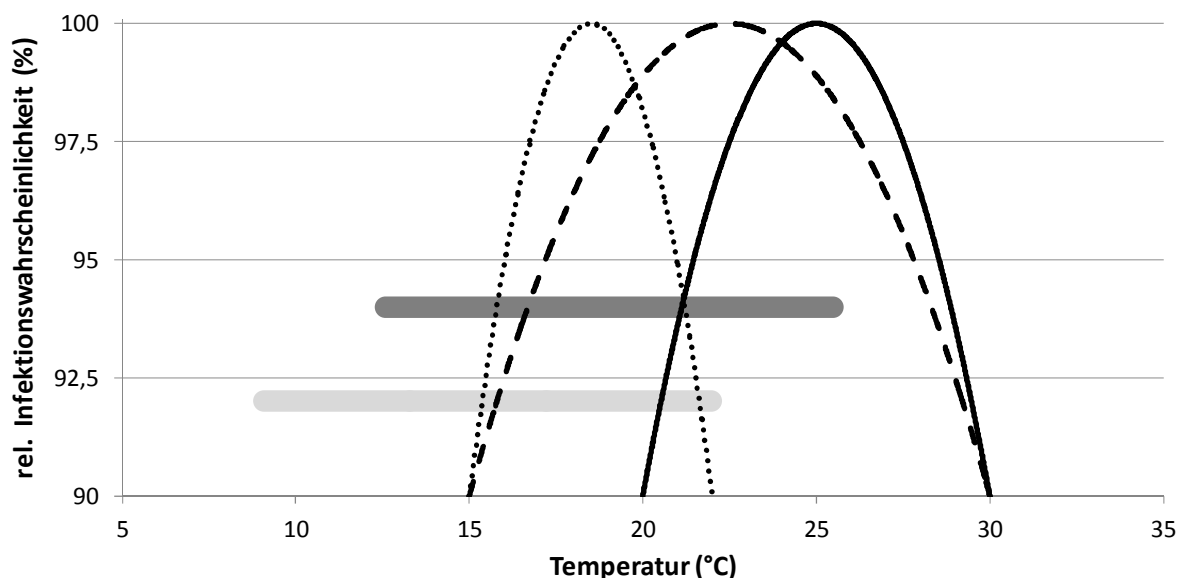
Verband man nun in einem ersten Schritt die drei Kurven der optimalen Entwicklung mit den aktuellen Temperaturen während der Zuckerrübensaison (hellgrauer Balken, Abb. 55), so ergab sich für Rost eine komplette Überschneidung von Temperaturbereich und Optimum, für Mehltau reichte das derzeitige Temperaturintervall bis zum Kurvenmaximum und bei Cercospora wurde nur der Anfangsbereich des Präferendums geschnitten.

Im Gegensatz dazu stand der Vergleich zwischen den drei Kurven und der möglichen maximalen Temperaturerhöhung bis 2100 (dunkelgrauer Balken, Abb. 55). In diesem zweiten Schritt zeigte sich deutlich, dass sich für Rost die Schnittmenge zwischen optimaler Entwicklung und Temperatur nicht verändert, jedoch für Mehltau sowie Cercospora eine Zunahme erfolgte. Hierbei war zu beachten, dass für Mehltau die Kurve der Temperatur einen abnehmenden Trend der relativen Infektionswahrscheinlichkeit am maximalen Grenzpunkt von 25,49 °C besaß. Hingegen Cercospora am gleichen Punkt ihren Entwicklungshöhepunkt anstrebte.

Eine durch den Klimawandel ausgelöste Temperaturerhöhung unter den hier betrachteten Bedingungen bringt für Cercospora und Mehltau ausschließlich Vorteile in der Entwicklung. Eine Verschlechterung der Wachstumsbedingungen für Cercospora, wie in den Abschnitten 4.5.1 bis 4.5.3 untersucht wurde, wird unter Betrachtung der Kombination aus Temperaturerhöhung und Optimum der Pilzentwicklung aller Voraussicht nach nicht stattfinden. Demzufolge wird sich die Dominanz von Cercospora über Mehltau in der Interaktion aller Voraussicht nach nicht verändern.

Tab. 92. **Mittlere Monatstemperatur in Deutschland (°C) von 1891 bis 2010** (DWD, 2012) für die wichtigen Monate, in denen die Zuckerrüben-Blattkrankheiten auftreten. In den rechten drei Spalten wurde auf die Werte von Minimum, Mittelwert und Maximum 3,5°C addiert, um den Grenzbereich der möglichen Klimaerwärmung bis 2100 darzustellen. Grau hinterlegte Zellen zeigen den geringsten und höchsten Wert im Zeitraum Juni bis September auf.

	mittlere Monatstemperatur (°C) in Deutschland (1891-2010)				mittlere Monatstemperatur (°C) in Deutschland (1891-2010) +3,5°C		
Monat	Minimum	Mittelwert	Maximum		Minimum	Mittelwert	Maximum
Juni	11,2	15,49	19,35		14,69	18,99	22,85
Juli	14,36	17,25	21,99		17,86	20,75	25,49
August	13,97	16,63	20,56		17,47	20,13	24,06
September	9,08	13,29	16,90		12,58	16,79	20,40



- Grenzbereich des Temp. Mittels Deutschland (1891-2010) für die Monate Jun.-Sept.
- Grenzbereich verschoben um +3,5°C
- Optimum Gesamtentwicklung R (Newton & Peturson, 1943)
- - Optimum Gesamtentwicklung M (Drandarevski, 1969b und Kluge et al., 1999)
- Optimum Gesamtentwicklung C (Bleiholder & Weltzien, 1972b und Kluge et al., 1999)

Abb. 55. **Vergleich zwischen Optimum der Gesamtentwicklung** für die drei Blattkrankheiten Cercospora (C), Mehltau (M) und Rost (R) aus Abb. 1 (Seite 20) (Übersetzung in drei Kurven), dem Grenzbereich (9,08 bis 21,99 °C) der **aktuellen mittleren Monatstemperaturen** (Juni bis September, (°C)) in Deutschland (1891-2010) (hellgrauer Balken) und dem Grenzbereich (12,58 bis 25,49 °C) der **möglichen Temperaturerhöhung von maximal 3,5°C** der Klimasimulation bis 2100 (dunkelgrauer Balken) (ANONYMUS, 2008).

4.6 Das theoretische Interaktionsmodell mit drei Blattkrankheiten

Die drei untersuchten Szenarien 1C2R3M, 1C2M3R und 1C2MR (verwendeter Parametersatz s. Abschnitt 3.4.5, Seite 53) zeigten für *Cercospora* einen einheitlichen Verlauf der Krankheitsausbreitung (Abb. 56a bis c). In der Solo- als auch in der Trio-Variante war *Cercospora* die erste Krankheit, die auftrat, und sich im Vergleich der drei Krankheiten am schnellsten ausbreitete. Es wurde jeweils eine Endbefallshäufigkeit von 89 % erreicht. Für Rost zeigte sich ein anderes Bild. Obwohl die Krankheit in der Trio-Variante 1C2R3M als zweite Krankheit die Pflanzen befiel, konnte sie erst zum Zeitpunkt $t = 97$ mehr Blätter als Mehltau befallen. Ihre Entwicklung war somit deutlich verzögert. Rost erreichte eine maximale Befallshäufigkeit in der Trio-Variante von 32 %. Mehltau lag mit 26 % knapp darunter, erlangte dieses Ziel in der Gegenüberstellung zu Rost bereits zum Zeitpunkt $t = 79$. Vergleicht man die beiden Solo-Varianten von Rost und Mehltau, so zeigte sich auch in dieser Betrachtung die langsamere Entwicklung von Rost. Mehltau erreichte die Kapazität von 71 % deutlich früher (M: $t = 89$ und R: $t = 116$).

Im zweiten Szenario 1C2M3R konnte sich Mehltau aufgrund des früheren Übertragungszeitpunktes noch deutlicher gegenüber Rost etablieren (Abb. 56b). Mehltau erreichte eine maximale Befallshäufigkeit von 29 % in der Trio-Variante zum Zeitpunkt $t = 85$. Rost blieb über den gesamten Beobachtungszeitraum unterhalb der Befallskurve von Mehltau und erlangte knapp 23 %.

Das dritte Szenario 1C2MR unterschied sich nur gering von den anderen beiden Fällen (Abb. 56c). Das Erstauftreten der beiden biotrophen Pilze lag zeitlich gleich auf, jedoch konnte auch unter diesen Voraussetzungen Rost erst zum Zeitpunkt $t = 100$ Mehltau in der Anzahl der befallenen Blätter übertreffen. Rost erreichte bis zum letzten Beobachtungstermin knapp 32 % und Mehltau 28 %. Da sich Rost aber deutlich langsamer ausbreitete als Mehltau, dominierte die zuletzt genannte Krankheit zu Beginn der Epidemie und wurde als zweitstärkste Krankheit hinter *Cercospora* wahrgenommen.

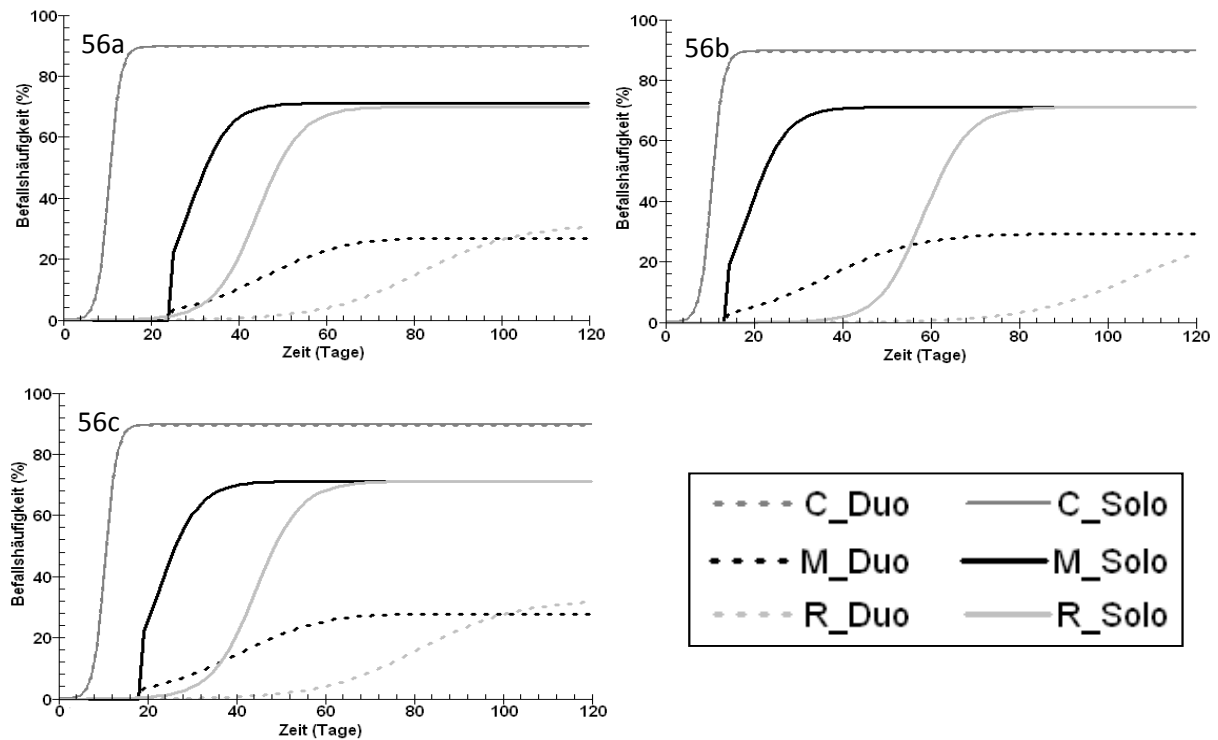


Abb. 56. Die **graphische Darstellung** des theoretischen Interaktionsmodells der **Trio-Varianten 1C2R3M (a), 1C2M3R (b) und 1C2MR (c)** auf Basis der Parameterschätzung der Variante 1C2M des Versuches Mai_2012 (Parameterwerte Tab. 8, Seite 54).

5 Diskussion

5.1 Der Ansatz und die Methodik

Ziel dieser Arbeit war es, das Auftreten und die Interaktion der drei Zuckerrüben-Blattkrankheiten Cercospora-Blattflecken, Mehltau und Rost zu untersuchen sowie ihr Verhalten unter dem Aspekt des Klimawandels zu bewerten. Anders als in vorherigen Untersuchungen zum Thema Interaktion (MADDEN ET AL., 1987; NGUGI ET AL., 2001) sollte die Betrachtung nicht nur auf Erhebungen von Felddaten beruhen, sondern als zusätzliche Basis auch Ergebnisse aus Klimaschrankversuchen genutzt werden. Dieser zweite Ansatzpunkt ermöglicht es, unter optimalen und kontrollierten Bedingungen, die Interaktion der Blattkrankheiten zu studieren. Die gewählte Herangehensweise ist insbesondere dann von Vorteil, wenn über das Verhältnis der Krankheiten zueinander noch keine Informationen anderer Versuchsansteller vorliegen. Freilandversuche haben den Nachteil, dass erhebliche Umwelteinflüsse, wie z. B. ungünstige Wetterbedingungen, ein zu geringes Inokulum oder eine schlechte Wasserversorgung, das Erkennen einer Interaktion begrenzen. Aus diesen Gründen wurde die Kombination aus zwei verschiedenen Methoden zur Bewertung der Interaktion gewählt.

Schwerpunkt der Klimaschrankversuche und somit auch der Modellierung der Interaktion wurde auf die beiden wärmeliebenden Blattkrankheiten Cercospora und Mehltau gelegt. Hierfür können insgesamt drei Gründe aufgeführt werden:

1. Das physiologische Präferendum in Bezug auf die Temperatur der beiden Blattkrankheiten überschneidet sich. Dies wurde insbesondere durch die Gegenüberstellung der Temperaturansprüche in den verschiedenen Phasen der Infektkette ersichtlich (Abb. 1, Seite 20). Der Faktor Temperatur ist, insbesondere unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels von Interesse, da die Prognose der Klimaforschung von einer Erhöhung ausgeht (ZEBISCH ET AL., 2005). Eine daraus ersichtliche Konsequenz wäre auf den ersten Blick, dass die Entwicklung der beiden Schaderreger bevorteilt würde im Gegensatz zu Rübenrost, dessen Optimum im niedrigen Temperaturbereich anzusiedeln ist.
2. Rost hat in deutschen Anbaugebieten nur eine geringe Bedeutung, was die Zahlen der Felddaten-Analyse belegen (Kapitel 4.1.1.1, Seite 55).
3. Mit zunehmender Anzahl der Interaktionspartner nimmt auch die Komplexität des zu untersuchenden Systems zu. Ein Beispiel hierfür ist die Anzahl an benötigten Parametern für das modifizierte LV-Modell, welche von der Duo- zur Trio-Variante von neun auf 18 Parameter ansteigt (Abschnitt 3.4.5, Seite 53).

Demzufolge lag der Schwerpunkt der Interaktionsanalyse auf *Cercospora* und Mehltau. Der Einfluss von Rost wurde nur in einem theoretischen LV-Modell analysiert.

5.1.1 Die Felddatenanalyse

Grundlage der Felddatenanalyse waren Befallserhebungen von 175 Standort-Sorten-Jahren, die im Rahmen der Erstellung und Validierung von Prognosemodellen erhoben wurden. Die Erhebungen fanden zwischen den Jahren 2000 und 2009 statt und waren zu Beginn dieser Arbeit bereits abgeschlossen. Aus diesem Grund konnten bei der Versuchsanlage und der Versuchsdurchführung keine der Fragestellung entsprechenden Inhalte einfließen. Die vorhandenen Daten wurden somit gemäß der Thematik Interaktion neu zusammengestellt und analysiert.

Da eine Einzelpflanzenmarkierung nicht durchgeführt wurde, konnte im Vergleich zu den Klimaschrankversuchen und anderen Interaktionsstudien (JÖRG, 1987; WEBER, 1992) keine detaillierte Entwicklung des Befalls von einzelnen Zuckerrüben oder Blättern im Feld dokumentiert werden. Demzufolge waren ausschließlich Aussagen über den Krankheitsverlauf der jeweiligen Zuckerrübenbestände bzw. der Gesamtsituation mit hohen Stichprobenumfängen möglich, was in der Analyse der Befallshäufigkeiten ($n = 89.445$), der Befallsstärken ($n = 136.907$) und bei der Feststellung der zeitlichen Reihenfolge ($n = 175$) zum Ausdruck kommt. Eine Analyse zur Feststellung des regionalen Auftretens der einzelnen Zuckerrübenblattkrankheiten war aufgrund der hohen Datenvariabilität beim Sortenspektrum (35 Sorten) und des damit verbundenen geringen Stichprobenumfangs je Standort nicht möglich. Neben dieser allgemeinen Betrachtung der Felddaten wurde, wenn möglich, auch eine Einteilung der vorliegenden Befallsverläufe nach den drei Interaktionsvarianten durchgeführt. Mit einem reduzierten Datensatz konnte daraufhin eine Bewertung der *sAUDPC*-Werte sowie der täglichen Wachstumsraten unter Feldbedingungen durchgeführt werden. Diese dienten als Basis für einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der Felddatenanalyse und den Klimaschrankversuchen.

5.1.2 Die Klimaschrankversuche

Begonnen wurden die Untersuchungen mit den Solo-Varianten der verschiedenen Temperaturstufen, um die Reaktion der einzelnen Blattkrankheiten ohne den Einfluss des anderen Interaktionspartners bewerten zu können. Diese wurden für beide Blattkrankheiten nicht parallel, sondern getrennt hintereinander durchgeführt, um Kontaminationen mit der jeweils anderen Krankheit zu vermeiden. Im Anschluss daran sollten ausschließlich Kombinationsvarianten untersucht werden. Der erste

Versuchsdurchgang im September 2011 zeigte jedoch, dass insbesondere bei Mehltau, aufgrund der Abwaschbarkeit des Myzels und der Bewertung einer erfolgreichen Infektion, eine Solo-Variante als Kontrollfunktion benötigt wurde. Ab dem zweiten Versuchsdurchlauf wurden diese dann für beide Krankheiten mitgeführt und wie bei RICHTER ET AL. (1988) auch für die Modellierung der Krankheit eingesetzt.

In den Klimaschrankversuchen wurden drei verschiedene Interaktionsvarianten (C=M, 1C2M, 1M2C) untersucht, die sich in dem Zeitpunkt der Inokulation unterschieden. Dieser Einflussfaktor wurde gewählt, da VOLLMER (2005) in ihrer Literaturrecherche den zeitlichen Vorsprung insbesondere bei biotrophen Arten als Vorteil feststellte. Die Felddaten-Analyse zeigte auf, dass *Cercospora* in mindestens 68,6 % der Fälle diesen Punkt für sich entscheiden konnte, demzufolge die Variante 1C2M am ehesten der heutigen Situation entspricht. Es stellt sich allerdings die Frage, ob Mehltau durch einen früheren Inokulationszeitpunkt, verbunden mit einer kürzeren Inkubationszeit im Temperaturoptimum, eine höhere Chance gegenüber *Cercospora* erhält und sich in der Interaktion durchsetzen könnte. Als Inokulationsabstand wurde ein 7 Tage Intervall gewählt, damit der Versuchsansatz (21 Tage mit drei Inokulationsterminen) und die gesamte Versuchsdauer (ca. 45 Tage) möglichst kurz blieben und mehrere Wiederholungen (n = 5) der Versuchsreihen durchgeführt werden konnten.

Als Schwerpunkt der Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Interaktion wurde die Temperatur gewählt, da dieser Faktor das Kernstück jeder Klimaanalyse ist und auch die Folgen der Klimaerwärmung bisher besser abzuschätzen sind als die Entwicklung zukünftiger Niederschlagsereignisse. Dies zeigen vergleichende Ergebnisse verschiedener Klimasimulationen mit realen Daten, bei denen für die Simulation des Niederschlages deutlich höhere Abweichungen zwischen den Modellen und realen Daten vorhanden waren als bei der Temperatur (JACOB ET AL., 2012).

Trotz der Fokussierung auf den Temperatureinfluss wurde die Wirkung von Niederschlag in Form eines einmaligen Regenereignisses in die Untersuchungen mit einbezogen. Grund war hierfür die Sprühinokulation mit *Cercospora* in den Interaktionsvarianten 1M2C und C=M. In der Variante C=M, mit gleichzeitigem Inokulationszeitpunkt, nahm die Blattnässe Einfluss auf die Mehltauinfektion, weil die Konidien des biotrophen Pilzes direkt nach der Sprühinokulation von *Cercospora* auf die Pflanze übertragen wurden und somit Kontakt mit freiem Wasser auf der Blattoberfläche hatten. In der Variante 1M2C hatte die Inokulations-Reihenfolge erst Mehltau, dann *Cercospora* zur Konsequenz, dass das zu bonitierende Mehltaumyzel teilweise abgewaschen wurde und somit ein Rückgang in der Befallshäufigkeit und der Befallsstärke zu verzeichnen war. Diese festgestellte Problematik wurde in einer zusätzlichen Versuchsreihe untersucht (Abschnitt 4.2.8, Seite 102). Es konnte jedoch kein

Zusammenhang zwischen Ausgangsbefall, Zeitpunkt des Regenereignisses und bonitiertem Befall nach der Behandlung mit Wasser festgestellt werden. Dieser schwer einzuschätzende Faktor wird auch in der Literatur bestätigt. Dabei ist die Charakterisierung des Schadens von Wasser auf die Entwicklung von Mehltau bisher ein ungelöstes Problem (YARWOOD, 1957; JARVIS ET AL., 2002). Aus diesem Grunde wurde als Schwerpunkt dieser Arbeit, insbesondere für die Klimaanalyse, die Befallshäufigkeit zur Beschreibung der Interaktion gewählt, da sie auf die angesprochene Problematik robuster reagiert als die sensibel zu bewertende Befallsstärke.

5.2 Das Interaktionsverhältnis zwischen Cercospora-Blattflecken und Mehltau in der Duo-Variante

Zur Beschreibung der Interaktion der beiden Blattkrankheiten wurde das LV-Modell eingesetzt, welches schon in anderen Arbeiten im Bereich der Phytopathologie seine Eignung unter Beweis stellte (MADDEN ET AL., 1987; WEBER, 1992; NGUGI ET AL., 2001). Wichtig für die Bewertung des Interaktionsverhältnisses ist dabei die Veränderung des Befallsverlaufes von der Solo-Variante hin zur Duo-Variante. Diese Beziehung zeigte sich insbesondere in der Modellierung der beiden September-Versuch, die keine eigenen Solo-Varianten vorweisen konnten. Die Verwendung von gemittelten Befallsverläufen der anderen Versuchsdurchgänge war speziell für die Schätzung des Anfangsbefalls von Mehltau und die beiden Konkurrenzkoeffizienten problematisch zu beurteilen. Der Vergleich zwischen dem Anfangsbefall in der Solo- und Duo-Variante von Mehltau wies große Sprünge auf, die so in den anderen Versuchsdurchgängen nicht beobachtet wurden (z. B. Tab. 48, Seite 113). Des Weiteren wurde bei den Konkurrenzkoeffizienten in 50 % der Fälle ein stärkerer Einfluss von Mehltau auf Cercospora geschätzt als umgekehrt. Diese Bewertung der Interaktion ergab sich in keinem der anderen Versuchsdurchgänge (Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012) und muss kritisch betrachtet werden. Eine Charakterisierung der Interaktion sollte immer auf Basis parallel durchgeführter Solo-Varianten beruhen und nicht aus gemittelten Befallsverläufen anderer Versuche entstehen.

Auf dem Verhältnis Solo- zu Duo-Variante für die jeweilige Krankheit baut der Konkurrenzkoeffizient auf, der den Einfluss des einen auf den anderen Interaktionspartner beschreibt. Ist dieser Wert gleich Null, so liegt keine Beeinflussung vor. Bei einer signifikanten Unterscheidung zum Wert Null kann von einer Einflussnahme gesprochen werden. Ist der Wert dabei positiv, handelt es sich um ein negatives Interaktionsverhältnis bzw. eine Hemmung. Bei einem negativen Wert liegt der umgekehrt Fall einer positiven Beeinflussung bzw. einer Förderung vor. Die statistische Bewertung der geschätzten Interaktionskoeffizienten auf Basis der Befallshäufigkeit (vergleiche Kapitel 4.4.1.5, Tab. 61,

Seite 125) zeigte in der Einzelbetrachtung der Varianten, dass bei den Duo-Varianten C=M (0,58) und 1C2M (0,53) wie auch bei Gesamtbetrachtung aller Interaktionsvarianten (Tab. 60, Seite 125) ein signifikant zu Null verschiedener positiver Wert für den Parameter a_{MC} (Einfluss Cercospora auf Mehltau) vorhanden war. Somit kann gesagt werden, dass hier eine negative Interaktion von Cercospora auf Mehltau vorlag. Bei der Einzelbetrachtung der Duo-Variante 1M2C konnte dieses Verhältnis der Blattkrankheiten statistisch jedoch nicht festgestellt werden, obwohl der Koeffizient mit einem Wert von 5,69 deutlich über den beiden anderen anzusiedeln war. Dies kann auf die hohe Streuung der fünf Versuchsdurchgänge zurückgeführt werden. Der Vergleich der Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen der drei Duo-Varianten für diesen Parameter C=M ($0,58 \pm 0,17$), 1C2M ($0,53 \pm 0,17$) und 1M2C ($5,69 \pm 7,29$) zeigt die deutlich höhere Abweichung in der zuletzt genannten Kombination.

Für den zweiten Konkurrenzkoefizient a_{CM} (Einfluss Mehltau auf Cercospora) konnte bei allen Duo-Varianten kein signifikanter Unterschied zu Null festgestellt werden (Tab. 61), womit eine Beeinflussung durch Mehltau ausgeschlossen werden kann. Was jedoch in der Detailbetrachtung auffällt, ist, dass in der Kombination C=M 2 Fälle, bei 1C2M 1 Fall und bei 1M2C 3 Fälle jeweils negative Konkurrenzkoefizienten aufwiesen, deren Schätzungen bis auf einen Wert alle signifikant waren. Dies deutet auf eine mögliche Förderung des perthotrophen Pilzes durch den biotrophen Pilz hin, auch wenn der Vergleich der Mittelwerte diese mögliche Beeinflussung nicht wiedergibt. Das beobachtete Phänomen wird ebenfalls in der Literatur bei verschiedenen Autoren beschrieben (WEBER, 1992; VOLLMER, 2005). In diesem Zusammenhang könnte man bei den Varianten C=M und 1M2C von einer Prädisposition (YARWOOD, 1959) oder einem „Steigbügeleffekt“ sprechen, der die Wirtspflanze durch die Primärinfektion (1M2C) bzw. die kürzere Inkubationszeit (C=M) von Mehltau schwächt und die Infektionsbedingungen für die nachfolgende Blattkrankheit begünstigt.

Eine weitere Möglichkeit das Interaktionsverhältnis der beiden Blattkrankheiten zu bewerten, ist die vergleichende Analyse der *sAUDPC*-Werte (Abschnitt 4.2.5, Tab. 39 Seite 100). Das Ergebnis der Varianz-Analyse stellte für Cercospora keine signifikanten Unterschiede zwischen der Solo- und den drei Duo-Varianten fest, im Gegensatz zu Mehltau. Für den biotrophen Pilz unterschied sich der *sAUDPC*-Werte der Solo-Variante (15,50 %) signifikant von denen der Kombinationsvarianten (0,74 bis 4,41 %). Demzufolge konnte Mehltau ein deutlich höheres Befallsniveau erreichen, wenn sich die Blattkrankheit ohne den Einfluss des Interaktionspartners entwickelte. Dieses Ergebnis unterstreicht die Resultate des statistischen Vergleiches der Konkurrenzkoefizienten und bestätigt die von WOLF (2001) formulierte Hypothese, dass starker Mehлтаubefall nur bei Fehlen von Cercospora möglich ist (vergleiche Abschnitt 2.4, Seite 24). Cercospora bleibt unbeeinflusst von der

Interaktion, hingegen erfährt Mehltau eine negative Beeinflussung durch den perthotropen Gegenspieler.

Als physiologische Ursache für die Interaktion zum Vorteil von *Cercospora* und zum Nachteil von Mehltau sind die unterschiedlichen Ernährungsweisen zu nennen. Der Ektoparasit *Cercospora* dringt über die Stomata in das Blattparenchym ein und wächst dort interzellulär. Nach der erfolgreichen Besiedlung tötet der Pilz durch die Abgabe des nicht wirtsspezifischen Toxin Cercosporin weiteres Wirtsgewebe ab. Bei diesem Vorgang wird Cercosporin durch Licht aktiviert und reagiert mit molekularem Sauerstoff unter Bildung von reaktivem Singulett-Sauerstoff ($^1\text{O}_2$) und Superoxid (O_2^-). Diese verursachen über Lipidperoxidation Schäden an Plasmamembranen, die zum Zelltod führen (WEIß, 2004; DAUB & CHUNG, 2009). Als Folge der Wirtszellenabtötung zu einem so frühen Zeitpunkt der Wirt-Parasit-Interaktion, umgeht die nekrotrophe *Cercospora* die induzierte Abwehrreaktion der Pflanze und erhält somit unmittelbar Zugang zur Nährstoffversorgung durch den Wirt (HORBACH ET AL., 2011). Mehltau hingegen lebt als biotropher Ektoparasit auf der Blattoberfläche und stülpt ausschließlich zur Nährstoffversorgung seine Haustorien in das Blattgewebe. Die Infektionsstrategie des Durchbrechens der Zellwand ist hoch komplex in der Interaktion mit der Wirtspflanze, deren molekulare Mechanismen bisher nur wenig erforscht sind (HORBACH ET AL., 2011). Der biotrophe Pilz besitzt jedoch im Gegensatz zu *Cercospora* keine abtötende Abwehrmaßnahme, da er auf einen lebenden Wirt angewiesen ist. Somit bedingt die unterschiedliche physiologische Lebensweise beider Parasiten in der Wirtspflanze die Interaktion der Blattkrankheiten zum Vorteil für *Cercospora*, deren Resultat sich im Auftreten der Befallshäufigkeit widerspiegelt.

Bei Einordnung der Wechselbeziehung zwischen *Cercospora* und Mehltau in die Kategorien der allgemeinen Populationsökologie, die in Abschnitt 2.2 (Seite 21) beschrieben wurden, müsste der betrachtete Fall eigentlich in die Kategorie *Amensalismus* eingeordnet werden, weil ausschließlich Mehltau Nachteile aus der Beziehung zieht und *Cercospora* davon unbeeinflusst bleibt. Da aber einige Fälle mit einer Förderung der *Cercospora* durch Mehltau vorlagen, könnte das Verhältnis auch zwischen *Amensalismus* und der Kategorie „eine Art zieht aus der Interaktion Vorteile und die andere Art erleidet Nachteile“ angesiedelt werden. In der zuletzt genannten Kategorie sind laut Definition aber nur der *Parasitismus* und die *Prädation* vorhanden, bei der die interagierenden Arten auf unterschiedlichen trophischen Ebenen stehen. Bei der Interaktion *Cercospora* und Mehltau befinden sich beide Blattkrankheiten jedoch auf einer trophischen Ebene. Aus diesem Grund kann keine genaue begriffliche Zuordnung in dieser zweiten Kategorie vorgenommen werden.

Da der Schwerpunkt dieser Interaktion auf einer einseitigen negativen Wechselbeziehung liegt, könnte der Begriff „einseitige Konkurrenz“ die vorliegende Situation ebenfalls adäquat beschreiben.

Problematisch bei dieser Formulierung ist der Begriff „Konkurrenz“, der eigentlich auf einer gegenseitigen negativen Beeinflussung beruht. Demzufolge muss der Wort-Zusatz „einseitig“ unbedingt angeschlossen werden. Vorteil der Verwendung des Begriffs „Konkurrenz“ ist eine zusätzliche Charakterisierung. Denn es kann unterschieden werden, ob es sich um eine *direkte* einseitige Konkurrenz (Interferenz) handelt oder eher eine *indirekte* einseitige Konkurrenz (Exploitation) vorliegt. Da die beiden Blattkrankheiten ohne den Einfluss der Wirtspflanze keine Wechselbeziehung eingehen würden, ist in diesem Zusammenhang vielmehr von einer einseitigen Exploitation als von einer einseitigen Interferenz zu sprechen.

5.2.1 Die Bewertung des modifizierte LV-Modells

Der verwendete Zusatz $\max \{0, \dots\}$ im modifizierten LV-Modell besaß Vorteile wie auch Nachteile in der Anwendung auf das Interaktionsverhältnis von Cercospora und Mehltau. Eingeführt wurde dieser Ansatz von WEBER (1992), weil bei pilzlichen Blattkrankheiten im Zuge des Krankheitsverlaufes die Blattfläche unwiderruflich befallen bzw. zerstört wird und nicht wie im ursprünglichen Modell ein Rückgang des Befalls möglich ist. Diese Modellergänzung ist für einen Endophyten wie Cercospora die richtige Wahl. Bei Mehltau zeigte die Verwendung dieses Ansatzes Schwierigkeiten. Auf der einen Seite lag zwar unter Einsatz des modifizierten LV-Modells zum Ende der Epidemie kein Rückgang des Befallsverlaufes vor, auf der anderen Seite konnte jedoch eine mögliche Verringerung der Befallshäufigkeit wie auch der Befallsstärke durch den Einfluss von Blattnässe, z. B. einer Sprühinokulation mit Cercospora, mit dieser Zusatzfunktion nur schwer abgebildet werden.

Als Ursache für den Rückgang der Befallsentwicklung kann die Lebensweise als Ektoparasit genannt werden. Das auf der Blattoberfläche befindliche Myzel konnte abgewaschen werden und führte zu einer Reduzierung des Befalls. Demzufolge muss die Aussage, dass ein unwiderruflicher Rückgang des Befalls durch Blattkrankheiten nicht möglich ist, mit dem Zusatz des Endophyten versehen werden. Bei Ektoparasiten ist das uneingeschränkte Wachstum aufgrund von äußeren Einflüssen nur begrenzt anwendbar. Diese Beeinträchtigung führte besonders in der Variante 1M2C zu Problemen in der validen Approximation der Interaktion, wenn als Datenbasis alle Befallswerte ab der ersten Inokulation zum Einsatz kamen. Unter Berücksichtigung dieses Phänomens wurde für die Duo-Variante 1M2C die Einschränkung vorgenommen, dass nur Befallswerte nach der Sekundärinokulation für die Modellierung der Interaktion genutzt wurden. Durch diese Vorgehensweise kam es bei der Schätzung des Anfangsbefalls in der Duo-Variante (MO_{Duo}) in einigen Fällen zu sehr hohen Anfangsbefallswerten (s. Mrz_2012 und Mai_2012 in Tab. 54), die in der

graphischen Darstellung zu einer senkrechten Verbindungslinie zwischen dem geschätzten Befallswert zwischen t_0 und t_1 führten (s. Abb. 35d und e).

Neben der Problematik der Modellierung von Ektoparasiten zeigte die Vergleichsanalyse des klassischen und des modifizierten Ansatzes nach WEBER (1992) (Abschnitt 4.4.3, Seite 141) drei weitere Punkte auf, die die Verwendung der Funktion $\max \{0, \dots\}$ mit sich brachte:

1. Als erstes ist hierbei zu nennen, dass die Blattkrankheit, die sich in der Duo-Variante zuerst etabliert, nach dem Erreichen eines maximalen Befallsniveaus im klassischen LV-Modell automatisch einen Rückgang des Befalls erfährt. Diese Reduzierung kann so weit gehen, dass sich das Interaktionsverhältnis der beiden Krankheiten zueinander umkehrt. *Cercospora* kann demzufolge zu Beginn der Epidemie der dominierende Partner in der Interaktion sein, sie muss diese Position aber nicht zwangsläufig bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes behalten. Die Verwendung der Modifikation führt somit zu einer Stabilisierung des maximalen Befallsniveaus der zuerst etablierten Krankheit.
2. Der zweite Punkt der Veränderung betrifft die später auftretende Krankheit in der Interaktion. Diese erzielt im klassischen Modell ein höheres Befallsniveau als in der modifizierten Variante. Die Stabilisierung der ersten Krankheit führt somit zu einem Nachteil der zweiten Krankheit in der Interaktion. Diese Minderung im Befall, hervorgerufen durch die Einflussnahme der modifizierten Funktion, ist kritisch zu betrachten, da sie die sich später etablierende Krankheit schwächer modelliert, als sie in Wirklichkeit ist.
3. Der dritte Punkt betrifft die Beeinflussung des Gleichgewichts der beiden Blattkrankheiten innerhalb der Duo-Variante zum Ende des Beobachtungszeitraums. Im klassischen Ansatz sind die ausschlaggebenden Parameter für das Verhältnis der Krankheiten zueinander die Konkurrenzkoefizienten und die Kapazitäten. Eine veränderte Rate nimmt keinen Einfluss auf das Niveau des Befalls. Der modifizierte Ansatz verleiht der Wachstumsrate hingegen den größten Einfluss auf die Beziehung der Interaktionspartner zum Ende des Betrachtungszeitraums, was die Gegenüberstellung der maximalen Befallshäufigkeiten in der Vergleichsanalyse zeigte (Tab. 76 bis 79, ab Seite 141). Wird die Rate zu Gunsten oder Ungunsten einer Krankheit verändert, so hat dies enorme Auswirkungen auf das Interaktionsverhältnis der beiden Blattkrankheiten.

Neben der Modellierung der Daten mittels LV-Modell wurde zusätzlich auch eine Anpassung der Daten mit einem einfachen logistischen Modell durchgeführt (Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2., Seite 70). Dieser Schritt wurde zu Beginn der Daten-Analyse angewandt, damit nicht nur ein Vergleich der Duo-Varianten möglich war, sondern auch die Solo-Varianten bei verschiedenen Temperaturstufen

gegenüber gestellt werden konnten. Ein Vorteil der einfachen logistischen Anpassung ist die Charakterisierung der Kapazitäten innerhalb der Duo-Varianten. Diese Möglichkeit ist im LV-Modell nicht gegeben, da sich die Kapazitäten in diesem Fall nur auf die Solo-Varianten beziehen. In Bezug auf diesen Parameter ist eine Vergleichbarkeit der beiden Modelle nicht gegeben. Für die Parameterschätzungen des Anfangsbefalls, aber auch der Wachstumsrate sieht das anders aus. Der Vergleich der beiden Systeme (logistische Anpassung und LV-Modell) zeigte keine systematischen Über- oder Unterschätzung der betrachteten Befallsverläufe durch eines der Modelle. Was jedoch auffiel, ist der starke Zusammenhang zwischen Anfangsbefall und Wachstumsrate. Steigt im Einzelversuch der geschätzte Anfangsbefall an, so verringert sich in den meisten Fällen die geschätzte Rate und umgekehrt. Es besteht zwischen diesen beiden Parametern eine deutliche Beziehung. Aufgrund dieser Problematik wurde für den übergreifenden Vergleich der Solo-Varianten bei unterschiedlichen Temperaturstufen eine zusätzliche Analyse der logistischen Funktion mit einem mittleren Anfangsbefall gemacht (Tab. 17, 19, 27 und 29, ab Seite 72), um eine zulässige Aussage über den Temperatureinfluss auf Kapazität und Wachstumsrate zu erhalten.

In der Bewertung der Parameterschätzung durch das modifizierte LV-Modell muss darauf hingewiesen werden, dass bei der Approximation der Parameter die Anfangswerte (CO_{Solo} , MO_{Solo} und MO_{Duo}) und die Konkurrenzkoeffizienten (a_{CM} und a_{MC}) die geringste und die Kapazität wie auch die Wachstumsrate die größte Präzision aufwiesen, was durch den Signifikantstest der geschätzten Parameter bestätigt wurde. Diese Feststellung wurde auch schon von anderen Anwendern des LV-Modells gemacht (MADDEN ET AL., 1987).

Eine verbesserte Anpassung der Daten wurde erreicht, wenn nicht nur für Mehltau zwei Startparameter approximiert wurden (MO_{Solo} und MO_{Duo}), sondern auch für Cercospora in der Solo- und Duo-Variante der Anfangsbefall individuell geschätzt wurde (nicht gezeigte Ergebnisse). Der Ansatz mit zwei spezifischen Anfangswerten wurde für Mehltau gewählt, um dem Einfluss des einmaligen Regenereignisses gerecht zu werden, für Cercospora war dieser Einwand jedoch nicht gerechtfertigt.

5.2.2 Die Problematik der Befallsstärke und die Vorteile der Verwendung der Befallshäufigkeit

Im Vergleich der erreichten Befallshäufigkeiten und Befallsstärken fällt auf, dass sich das Niveau beider Merkmale deutlich voneinander unterscheidet. Insbesondere Mehltau erzielte in den Interaktionsvarianten nur mittlere Befallsstärken von 1,58 bis 7,19 % (Abschnitt 4.2.2.4, Seite 89). Cercospora hingegen erreichte in den gleichen Fällen 42,33 bis 45,72 % (Abschnitt 4.2.2.3, Seite 87).

Diese enorme Differenz kommt bei Verwendung der Befallsstärke als Basis der Interaktionsmodellierung zum Tragen und führte in der Schätzung des Konkurrenzkoeffizienten zum Vorhandensein von zum Teil unrealistischen Werten (z. B. 6965,58 in Tab. 62 oder 782,66 in Tab. 66). Für die Duo-Variante C=M und 1C2M war diese Problematik, aufgrund des Inokulationszeitpunktes von Mehltau, noch stärker ausgeprägt. Die Approximation der Befallsstärkewerte mittels Marquardt-Methode konnte in diesen Varianten nur unter Fixierung einzelner Parameter durchgeführt werden, da eine valide Optimierung mit dieser Methode unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren nicht in allen Fällen möglich war. Bei der Variante 1M2C wirkte sich der frühere Inokulationszeitpunkt von Mehltau positiv auf die Entwicklung der Befallsstärke aus, wodurch auch die Durchführung eines validen Optimierungsprozesses möglich war.

Als Ursachen für das geringe Befallsstärkeniveau von Mehltau in den Interaktionsvarianten können drei Faktoren benannt werden:

1. Die schwer einzuschätzende Wirkung der Blattnässe auf den Befallsverlauf bzw. die Infektion in Kombination mit einem relativ kurzen Inokulationsabstand von sieben Tagen bzw. einer gleichzeitigen Inokulation von beiden Blattkrankheiten in der Variante C=M.
2. Die jahreszeitlich bedingte Qualität des Mehltau-Inokulums.
3. Die Quantität oder Konzentration des Mehltau-Inokulums.

Für die Versuche Nov_2011, Mrz_2012 und Mai_2012 (Variante 1M2C) kommt als mögliche Ursache nur Punkt 1 in Frage, da Mehltau in der Solo-Variante ein sehr hohes Befallsniveau erzielte. Für die Versuche Sept_2011_1 und Sept_2011_2 sowie Mai_2012 (Varianten C=M und 1C2M) hingegen sind alle drei Ursachen möglich. Im September-Versuch fehlte eine Solo-Mehltau-Variante als Kontrolle, weshalb für die Modellierung gemittelte Solo-Ergebnisse der anderen Versuchsdurchgänge eingesetzt wurden. Eine Einschätzung des Ausgangsinokulum bzgl. Qualität und Quantität war in diesem Fall nicht möglich. Im Mai-Versuch (Varianten C=M und 1C2M) könnte Punkt 3 der Grund für das niedrige Befallsstärkeniveau gewesen sein, was sich durch die minimalen Kapazitäten von Mehltau in den Solo-Varianten dieses Versuchsdurchganges (K_M : 7,19 bzw. 8,58 %) äußert. Die genannten drei Faktoren sind möglicherweise Ursachen für die signifikanten Unterschiede der verschiedenen Funktionsparameter in den fünf Versuchsdurchgängen (vergleiche Abschnitt 4.4.1.4, Tab. 58 und 59, Seite 123). Dies deutete sich auch bei den geschätzten Parametern der logistischen Funktionen der einzelnen Versuchsreihen von Solo M bei 25 °C an, die ebenfalls durch eine hohe Streuung gekennzeichnet waren (Abschnitt 4.2.1.2 und 4.2.2.2, ab Seite 73).

Das Problem eines zu geringen Befallsniveaus zeigte sich auch bei der Modellierung des Interaktionsverhältnisses von *Septoria nodorum* und *Erysiphe graminis* (WEBER, 1992). In den Feldversuchen der Kombinationsvariante wurden ausschließlich Befallsstärken von *E. graminis*

erreicht, die eine maximale Befallsstärke von 2 % nicht überschritten. Die Schätzung der Interaktionskoeffizienten führte zu Werten zwischen 1,03 und 85,13. Zudem lag eine hohe Streuung zwischen den einzelnen Versuchsjahren und den beiden Krankheiten vor (1,03 bis 4,32 für Septoria und 12,61 bis 85,13 für Mehltau). Gründe wurden hierfür in der starken Einflussnahme der Witterung und der unterschiedlichen Aggressivität des eingesetzten Septoria-Inokulums gesehen, was mit den eigenen Begründungen für ein zu geringes Befallsniveau zum Teil übereinstimmt.

Im Zusammenhang mit einer niedrigen Kapazität der Befallsstärke in den parallel geführten Solo-Varianten der Interaktionsversuche muss zusätzlich folgende Beziehung berücksichtigt werden. Eigentlich geht man davon aus, dass ein hoher Anfangsbefall zu einem schnellen Erreichen der Kapazität führt und ein niedriger Anfangsbefall ausschließlich eine Verzögerung im Erlangen des gleichen Kapazitätsniveaus bewirkt. In den Varianten C=M und 1C2M des Mai-Versuchs lag dieses potentielle Niveau der Kapazität jedoch außerhalb des Beobachtungsfensters (Abb. 36e und 37e, Seite 127), da die festgestellten Kapazitäten nur eine Befallsstärke von 7,19 und 8,58 % annahmen. Die Kapazitäten der Versuche Nov_2011 und Mrz_2012 lagen im Vergleich dazu auf einer viel höheren Stufe. Man kann also nicht unbedingt von einem Versuch auf den anderen schließen. Jede Versuchsreihe muss individuell betrachtet und modelliert werden, da sich der Krankheitsverlauf und die erreichte Kapazität innerhalb eines definierten Zeitraumes deutlich unterscheiden können.

In der Gegenüberstellung von Befallshäufigkeit und Befallsstärke muss desweiteren in der Interaktion beachtet werden, dass die Summe des maximalen Befallsniveaus der Blattkrankheiten je nach betrachtetem Merkmal unterschiedliche Werte annehmen kann. Wie in Abschnitt 3.1.1 (Seite 33) beschrieben, ist ein Überwachsen der drei Blattkrankheiten nicht möglich. Somit ergibt sich für die Befallsstärke eine Gesamtbefallsstärke aller Krankheiten von 100 %. Für die Befallshäufigkeit sieht dies anders aus. Hier kann jedes Blatt von jedem Pilz befallen werden, was sich in der verwendeten Trio-Variante CMR widerspiegelte. Demzufolge ist eine Gesamtbefallshäufigkeit bei zwei Blattkrankheiten von bis zu 200 % möglich und bei drei erhöht sich das maximale Niveau auf 300 %. Dieser Unterschied muss in der Modellierung der Interaktion unter Verwendung der Befallsstärke berücksichtigt werden, spielte aber, aufgrund des geringen Befallsniveaus von Mehltau, in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle.

Wie man annehmen könnte, ist die hier diskutierte Summe der maximalen Befallshäufigkeit jedoch kein fest definierter Wert im LV-Modell, sondern kann sich je nach betrachtetem Schaderreger individuell verändern. Bei der Interaktionsmodellierung von Virosen zeigte sich am Beispiel von MADDEN ET AL. (1987), dass die untersuchten Viruserkrankungen nicht beide gleichzeitig auf der Pflanze zu erkennen waren, sondern nur Symptome der zuerst infizierten Krankheit visuell sichtbar wurden. Folglich konnte in diesem Fall die Befallsstärke als Maßeinheit für die Interaktion nicht

verwendet werden. Die Beschreibung der Beziehung der Virose zueinander beruhte demzufolge auf der Befallshäufigkeit. Daher liegt ein Vorteil in der Modellierung auf Basis der Befallshäufigkeit darin, dass man sie bei allen Schaderregern verwenden kann und nicht nur auf einzelne Blattkrankheiten beschränkt bleibt.

Weitere Vorzüge der Modellierung auf Grundlage der Befallshäufigkeit sind zum einen der mögliche Einsatz der Ergebnisse für die Nutzung im Konzept der wirtschaftlichen Bekämpfungsschwelle und zum anderen die Verwendung in Prognosemodellen für das Erstauftreten der untersuchten Krankheiten. Grundlage für eine Behandlungsentscheidung ist die Einschätzung der Befallshäufigkeit durch den Landwirt. Die Befallsstärke spielt in der rein praktischen Betrachtungsweise nur eine untergeordnete Rolle. Auch für die Prognose mittels Modell wird bei allen Blattkrankheiten der Zuckerrübe ausschließlich die Befallshäufigkeit verwendet.

Im Zuckerrübenanbau sind *Cercospora* und Mehltau zwei gleichwertig zu behandelnde Blattkrankheiten, deren Vorhandensein im Pflanzenbestand durch ein dreistufiges Bekämpfungsschwellenkonzept beurteilt wird (LANG, 2005). Die erste Stufe, die die Befallssituation bis Anfang August einschätzt, liegt bei 5 % Befallshäufigkeit. Diesen Wert, wie auch die folgenden zwei Schwellenwerte, kann eine Krankheit alleine haben oder er setzt sich als Summe aus den verschiedenen Blattkrankheiten zusammen. Die zweite Stufe liegt bei 15 % und gilt von Anfang bis Mitte August. Im Anschluss wird für die restliche Saison der Wert 45 % verwendet. Zwei der drei Stufen (5 und 15 %) haben in Bezug auf die Interaktion nur eine geringe Bedeutung, da bei diesem Befallsniveau eine Interaktion auf Basis der Befallshäufigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Anders sieht es bei der dritten Stufe von 45 % aus. Ein Befallsniveau in dieser Höhe, welches beim Auftreten von *Cercospora* und Mehltau eine Summe aus beiden Blattkrankheiten repräsentiert, zeigte in der Interaktionsmodellierung (Abschnitt 4.4.1), dass eine gegenseitige Beeinflussung möglich ist. In diesem Fall könnte der Einsatz des Interaktionsmodells, die Entscheidungsfindung für oder gegen eine Behandlung möglicherweise verbessern. Hierfür könnte der im Interaktionsmodell verwendete Konkurrenzkoefizient in die Berechnung der Befallsverläufe als ergänzender Faktor mit einbezogen werden. Dies setzt voraus, dass die bisher unabhängig voneinander laufenden Modelle beider Blattkrankheiten miteinander verknüpft werden, um die Befallsentwicklung vom Erstauftreten bis zum Überschreiten der Bekämpfungsschwelle, unter dem Einfluss der jeweils anderen Blattkrankheit, zu modellieren.

Würde die Befallsstärke als Grundlage dienen, könnte es bei Mehltau aufgrund des Koloniewachstums auf der Blattoberfläche und seiner parasitischen Lebensweise, ohne direkte Schädigung des Wirtes, zu einer Überschätzung im Schädigungsgrad des Zuckerrübenblattapparates

kommen. *Cercospora* hingegen wächst zunächst im Verborgenen innerhalb des Blattes und wird erst durch eine Gewebeabtötung sichtbar, die aber, bedingt durch die perthotrophe Lebensweise, auch einen viel höheren Schaden anrichtet als dies für Mehltau der Fall ist. Somit ist die Befallshäufigkeit eine Maßeinheit, die unbeeinflusst von den unterschiedlichen ökologischen Nischen der beiden Blattkrankheiten bleibt.

Nachteil der Modellierungsgrundlage auf Basis der Befallshäufigkeit ist das erschwerte Erkennen des Erstauftretens von Mehltau. Zur Identifikation der ersten sternförmigen Mehltaukolonie müssen optimale Lichtverhältnisse vorhanden sein und der Boniteur muss ein geschultes Auge besitzen, damit wegen Nichterkennens keine Unterschätzung der Befallssituation stattfindet. Die Bestimmung des Erstauftretens von *Cercospora* ist im Vergleich dazu aufgrund der Symptomatik einfacher.

5.3 Der Vergleich der Feld- Klimaschrankbedingungen

Die festgestellte Dominanz von *Cercospora* über Mehltau in der Befallshäufigkeit wird auch durch die Ergebnisse der allgemeinen Felddaten-Analyse bestätigt. Die Häufigkeit der einzelnen Krankheiten in den Solo- und Duovarianten (vergleiche Kapitel 4.1.1.1, Seite 55) zeigte eindeutig, dass *Cercospora* in 73,7 % der Fälle auf den befallenen Blättern auftrat und somit die dominierende Blattkrankheit im Zuckerrübenanbau darstellt. Mehltau war hingegen nur in 44,3 % vorzufinden.

Bei der Analyse der Befallsstärke (vergleiche Kapitel 4.1.2.1, Seite 60) anhand von sechs Befallsstärkeklassen zeigte sich für *Cercospora*, dass die Mehrheit (77,7 %) der bonitierten Blätter eine Befallsstärke von maximal 10 % aufwies. Bei Mehltau lag der Anteil der beiden niedrigsten Befallsklassen in der Summe bei nur 46,3 %, was daraufhin deuten könnte, dass Mehltau eine Blattkrankheit ist, die in der Befallsstärke besser abschneidet als *Cercospora*. Auch die Analyse der *sAUDPC*-Werte auf Basis der Felddaten (Abschnitt 4.1.2.3, Seite 66) bestätigt, dass Mehltau eine signifikant höhere Entwicklung der Befallsstärke vorweisen kann (23,01 %), als dies für *Cercospora* der Fall ist (2,34 %). Diese Feststellung steht im Gegensatz zu den niedrigen mittleren Befallsstärken in den Klimaschrankversuchen und deutet auf eine Unterschätzung von Mehltau und eine Überschätzung von *Cercospora* in Bezug auf die Befallsstärkeentwicklung unter Klimaschrankbedingungen hin.

Die Widersprüchlichkeit, der im Feld und im Labor erhobenen Ergebnisse auf Basis der Befallsstärke, muss zusätzlich aber immer unter den Grundvoraussetzungen betrachtet werden, die bei der Erhebung von Feld- und Klimaschrankdaten vorhanden waren. Auch WEBER (1992) stellte diese Diskrepanz zwischen Feld- und Gewächshausversuchen fest und fand eine Erklärung für den geringen Mehлтаubefall in der Fokussierung auf den Primärbefall im Gefäßversuch. Bei Feldversuchen floss in

die Bewertung der Interaktion die gesamte Anbausaison unter Berücksichtigung der gesamten Befallsentwicklung einschließlich Sekundärinfektionen ein. Diese können in kurzen geschlossenen Systemversuchen so nicht zum Tragen kommen, sind für Mehltau aber von entscheidender Bedeutung.

Desweiteren müssen die Bedingungen, unter denen Versuche durchgeführt werden, als vernetzter Komplex verstanden werden, der Einfluss auf das Auftreten und die Intensität der Krankheit nimmt. Im Klimaschrank herrschen z. B. konstante Temperaturbedingungen, die im Freiland so nie vorkommen würden. Auf dem Feld kann der Temperaturunterschied zwischen Nacht und Tag, aber auch während nur weniger Stunden deutlich variieren. Auch die Luftfeuchtigkeit und die Blattnässedauer sind durch den Witterungseinfluss im Freiland einer deutlich höheren Streuung unterworfen als in einem geschlossenen System. Bei Betrachtung dieser Wetterparameter muss ebenfalls der Jahreseffekt mit einbezogen werden, der die Ausprägung der Krankheit beeinflusst. Des Weiteren liegt in der Freilandsituation ein natürliches Inokulum vor, welches in der Konzentration deutlich geringer ausfällt als im Versuch. Ferner ist auf dem Feld auch eine heterogenere Verteilung des Inokulums vorhanden, die mit einer Sprühinokulation nicht simuliert werden kann. Der Sorteneinfluss wurde durch die Einschränkung der BSA-Note bei der Auswahl der Daten zwar berücksichtigt, jedoch spielt auch der Einfluss durch die Wirtspflanze eine erhebliche Rolle bei der Krankheitsausprägung. Weitere Faktoren sind die Standorteigenschaften, die mit der Anbauintensität in der Region, der Fruchtfolge, der Bodenart (Wasserversorgung), der Düngung und auch der Bewirtschaftungsform (wendend/nicht wendend) Einfluss auf das Inokulum und demzufolge auch auf die Dynamik der Krankheit nehmen. Als letzter Effekt ist die Wirkung von weiteren Blattkrankheiten, z. B. Rübenrost oder *Ramularia*, sowie Wurzelkrankheiten (*Rhizoctonia solani* oder *R. violacea*), Virosen (*Rizomania* (beet necrotic yellow vein virus, BNYVV)) und Nematoden (*Meloidogyne hapla* oder *Ditylenchus dipsaci*) zu nennen, deren Einflussnahme unter kontrollierten Bedingungen überhaupt nicht vorhanden ist. Somit ist eine Übertragung der Ergebnisse aus dem Klimaschrank auf das Feld und die umgekehrte Herangehensweise nur eingeschränkt möglich. Die verschiedenen Versuchsformen bzw. Datenerhebungen müssen eher als kritisches Hinterfragen des jeweils anderen Systems angesehen werden, um das hochkomplexe Gefüge einer Interaktion verschiedener Blattkrankheiten zu verstehen.

5.4 Der Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten und die Interaktion von Cercospora-Blattflecken und Mehltau

Wie in Abschnitt 2.7 beschrieben, sind die Folgen des Klimawandels aufgrund der Wetteraufzeichnungen seit Ende des 19. Jahrhunderts durch Vergleichsstudien heute schon nachzuweisen. Insbesondere der Einflussfaktor Temperatur zeigt signifikante Veränderungen in den letzten 100 Jahren. Die Verknüpfung der Klimadaten aus Vergangenheit und Gegenwart mit globalen und regionalen Klimamodellen zeigt, dass es bis zum Jahr 2100 in Deutschland zu einer Temperaturerhöhung um bis zu 3,5 °C kommen kann (ZEBISCH ET AL., 2005; ANONYMUS, 2008). Verbindet man diese Information mit dem Wissen über die Blattkrankheiten an Zuckerrüben, so zeichnet sich folgendes Bild. In Abbildung Abb. 55 (Seite 172) wurden die Temperaturansprüche der verschiedenen Phasen der Infektkette der drei Blattkrankheiten aus Literaturquellen zusammengefasst und als relative Infektionswahrscheinlichkeit von 90 bis 100 % dargestellt. Die Verknüpfung dieser Kurven mit dem derzeitigen und dem potentiell zukünftigen Temperaturbereich während der wichtigen Phase in der Cercospora und Mehltau auftreten, zeigt auf, dass eine Temperaturerhöhung beiden Blattkrankheiten Vorteile verschafft im Gegensatz zu Rost, der auf unverändertem Niveau bleibt.

Neben diesen rein theoretischen Annahmen wurde in den eigenen Versuchen unter kontrollierten Bedingungen untersucht, wie der Einfluss des Klimawandels auf Cercospora und Mehltau zu beurteilen ist. Dabei wurden zunächst beide Blattkrankheiten unabhängig voneinander bei drei unterschiedlichen Temperaturstufen geprüft. Ziel war es herauszufinden, wie sich der Parameter Temperatur auf das Auftreten (Inkubationszeit) und die Ausbreitung (Anfangsbefall, Wachstumsrate, Kapazität) auswirkt.

Die Analyse der Inkubationszeiten für Cercospora und Mehltau ergab, dass sich bei beiden Krankheiten eine Zunahme der Temperatur im Bereich 10 bis 30 °C positiv auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit auswirkt. Dies zeigten zum gleichen Maße die eigenen Versuche, aber auch der Vergleich mit Literaturdaten (Abschnitt 4.2.3, ab Seite 93). Überträgt man dieses Ergebnis auf die Fragestellung der Auswirkungen des Klimawandels, so wird sich das Erstauftreten beider Pilze innerhalb der Vegetation möglicherweise verfrühen. Stellt man die Resultate von Cercospora und Mehltau gegenüber, so fällt auf, dass Mehltau eine deutlich kürzere Inkubationszeit besitzt als Cercospora. Bei weniger als 12 °C beträgt der Zeitraum von der Anlandung der Spore bis zum Sichtbarwerden der ersten Symptome mindestens 40 Tage für Cercospora und nur ca. 13 Tage für Mehltau. Im Temperaturoptimum zwischen 25 und 30 °C verkürzt sich die Zeitspanne für Cercospora auf 7 bis 9 Tage und für Mehltau auf 5 bis 6 Tage. Demzufolge kann Cercospora mit steigenden Temperaturen zwar in der Geschwindigkeit zulegen, der Infektionszyklus von Mehltau ist jedoch

immer noch schneller vollzogen und es können innerhalb der Saison mehr Infektionszyklen durchlaufen werden.

Ein weiterer Faktor, der für die Bevorteilung von Mehltau beim Klimawandel spricht, ist der Feuchtigkeitsanspruch für eine erfolgreiche Infektion der Zuckerrübe. Mehltau kann, da die Konidien zu einem Großteil aus Wasser bestehen, in einem weiten Bereich des Luftfeuchtegehaltes die Pflanzen infizieren. Anders sieht dies bei *Cercospora* aus. Hier muss eine sehr hohe relative Luftfeuchte vorhanden sein (>90 %), um ein Blatt erfolgreich zu besiedeln. Die Einschätzung über die Abnahme von Sommerniederschlägen um bis zu 40 % und die Zunahme von Hitzetagen und Hitzewellen könnten ein Indiz dafür sein, dass in manchen Jahren oder Regionen Mehltau aufgrund seiner xerophyten Eigenschaft gefördert werden könnte. Diese Bewertung des Niederschlages muss jedoch mit höherer Vorsicht betrachtet werden als die der Temperatur, da der Einflussfaktor Niederschlag aufgrund seiner regionalen Bedeutung schwerer zu simulieren ist (ZEBISCH ET AL., 2005).

Nachteil des hohen Wassergehaltes der Mehltaukonidien ist die schlechte Überwinterungsfähigkeit in der gemäßigten Klimazone Mitteleuropas. Unter heutigen Bedingungen überwintert Mehltau in warmen Mittelmeergebieten und erreicht die hiesigen Regionen erst mit den Winden im Frühsommer. *Cercospora* hingegen kann auch unter den vorhandenen Konditionen in Deutschland überwintern und ist zu Beginn der Vegetation bereits in den Zuckerrübenregionen präsent. Somit ist dies ein Vorteil für *Cercospora*. Ob die Überwinterungsbedingungen sich in Mitteleuropa verändern, bleibt abzuwarten, jedoch spräche eine globale Erderwärmung, die durchaus mit einer Reduzierung der Frosttage einhergeht, für eine frühere Etablierung von Mehltau in den Anbauregionen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass unter Betrachtung der Inkubationszeit und verschiedener Wetterparameter (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) der Klimawandel mehr Vorteile für Mehltau bringt, als dies für *Cercospora* eingeschätzt werden kann.

Nach der Beurteilung des Wettereinflusses folgt nun die Bewertung der einzelnen Modellparameter in Abhängigkeit von der Temperatur. In der Entwicklung der Befallshäufigkeit für *Cercospora* (vergleiche Abschnitt 4.2.1, Tab. 17, Seite 72) wurde tendenziell für die drei untersuchten Temperaturstufen festgestellt, dass mit steigender Temperatur bis zum Temperaturoptimum die Wachstumsrate zunimmt. Diese Beobachtungen können jedoch nur als Trend angesprochen werden, da gerade für die niedrigen Temperaturstufen 15 und 20 °C zu wenige Versuchswiederholungen vorlagen. Bei Mehltau konnten aufgrund der hohen Streuung der Daten keine Aussagen über Zusammenhänge zwischen Temperatur und den drei untersuchten Parametern gemacht werden (Tab. 19, Seite 74).

Für die Entwicklung der Befallsstärke unter dem Einfluss von steigenden Temperaturen sah die Situation etwas anders aus (vergleiche Abschnitt. 4.2.2, Tab. 27, Seite 83). Hier konnte für die Kapazität bei *Cercospora* tendenziell eine Zunahme der maximal zu erreichenden Befallsstärke unter der Voraussetzung einer Temperaturzunahme bis zum Optimum festgestellt werden. Die Kapazität und der Anfangsbefall blieben davon unberührt. Bei den Versuchsdurchgängen für Mehltau konnte bei keinem der drei Parameter ein Zusammenhang erkannt werden (Tab 29, Seite 86). Grund war hierfür erneut die hohe Datenvariabilität.

Fasst man die Beobachtungen aus dem Vergleich von Befallshäufigkeit und Befallsstärke zusammen, so kann der Faktor Temperatur Einfluss auf die Kapazität und die Wachstumsrate der Krankheit nehmen. Bei der Befallshäufigkeit ist jedoch eher eine Erhöhung der Rate beobachtet worden als bei der Befallsstärke. Bei dem zuletzt genannten Merkmal scheint die Kapazität auf den Einfluss der Temperatur zu reagieren. Die geringe Wiederholungsanzahl schränkt zwar die Aussagefähigkeit ein, jedoch ist die Reaktion der Blattkrankheiten auf eine Temperaturveränderung für *Cercospora* aufgrund der geringeren Datenstreuung eindeutiger zu interpretieren als für Mehltau.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die interspezifische Beziehung verschiedener Blattkrankheiten dar. Was aber zusätzlich berücksichtigt werden muss, ist die intraspezifische Beziehung innerhalb der einzelnen Populationen der betrachteten Pilzarten. Diese kann sich durch den Einfluss des Klimawandels ebenso verändern wie das Verhältnis der verschiedenen Arten zueinander. Nach heutigem Stand des Wissens werden für Rübenmehltau keine physiologischen Rassen unterschieden, jedoch könnte die sexuelle Vermehrung die Entwicklung neuer Pathotypen fördern (FRANCIS, 2002). Bei *Cercospora* sind bisher zwei verschiedene Rassen (C1 und C2) beschrieben, die sich in ihrer Virulenz unterscheiden. Bisher wird jedoch keine separate Betrachtung der beiden Rassen vorgenommen (WEILAND & KOCH, 2004). Im Gegensatz zu Mehltau ist ein sexuelles Entwicklungsstadium bei *Cercospora* bisher nicht bekannt (CHUPP, 1953), deshalb ist die Wahrscheinlichkeit zur Entwicklung weiterer physiologischer Rassen geringer einzuschätzen als für Mehltau.

Durch die Erwärmung des Klimas kann es auf der einen Seite zu einer Erhöhung der Reproduktionsrate kommen, andererseits verlängert sich die Anbausaison, die eine schnellere Pathogenevolution erlaubt. Demzufolge könnte das Potential einer Anpassung an die neuen Klimabedingungen insbesondere bei größeren Populationen und einer verbesserten Überwinterung erhöht sein (GARRETT ET AL., 2006). Neben der direkten Förderung der Aggressivität durch verbesserte Klimabedingungen, könnte indirekt eine veränderte Wirtsresistenz die Virulenz fördern (CHAKRABORTY & DATTA, 2003). Somit stellt die intraspezifische Konkurrenz innerhalb einer Art einen weiteren

Einflussfaktor dar, der in der Betrachtung der Interaktionen zwischen verschiedenen Arten nicht vernachlässigt werden darf. Eine erhöhte Aggressivität innerhalb einer Art könnte zur Konsequenzen haben, dass sich das Verhältnis zwischen den Arten verschiebt.

5.5 Die Bewertung der Szenarien-Analyse für das Auftreten und die Interaktion der Zuckerrübenblattkrankheiten

Das Ziel der Szenarien-Analyse des Interaktionsmodells war es herauszufinden, ob sich das Verhältnis der beiden Blattkrankheiten zueinander verändert. Bei Mehltau und Cercospora stellt sich also die folgende Frage: Bleibt die Dominanz von Cercospora erhalten oder kann sich Mehltau unter gewissen Bedingungen durchsetzen? Hierbei ist von besonderem Interesse, ob eine Verbesserung der Situation von Mehltau alleine durch eine Förderung der Blattkrankheit stattfindet oder gleichzeitig auch eine Schwächung der anderen Blattkrankheit notwendig ist.

In den Varianten wurden insgesamt drei Parameter (Wachstumsrate, Kapazität, und Anfangsbefall) in ihrer Einflussnahme untersucht. In Anlehnung an die prognostizierte Temperaturerhöhung bis 2100 (vergleiche Abschnitt 2.7) wurden jeweils drei Szenarien untersucht, deren Staffelung auf 10, 20 und 50 % festgelegt wurde. Zusätzlich zu der stufenweisen Veränderung der einzelnen Parameter wurden in jeweils einem Fall die beiden Raten der Feldbeobachtungen gleichzeitig verwendet, um den Einfluss der Umweltfaktoren auf die Interaktion zu bewerten.

Die verschiedenen Szenarien wurden exemplarisch an den Versuchsdurchgängen Nov_2011 und Mai_2012 durchgeführt, da bei ihnen eigene Solo-Varianten und alle untersuchten Interaktionsvarianten vorhanden waren.

Die Dominanz von Cercospora über Mehltau zeigte sich insbesondere in den Varianten C=M und 1C2M. In der Variante 1M2C wurde die Beobachtung gemacht, dass in vier von fünf Versuchsdurchgängen Mehltau zu Beginn der Epidemie einen Vorsprung in der Besiedlung der Zuckerrübenblätter aufwies, den die Blattkrankheit nur in einem Fall bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes behaupten konnte. In diesem Versuch (Mai_2012) schaffte sie es über den gesamten Zeitraum die dominierende Blattkrankheit in der Befallshäufigkeit zu sein. Deshalb ist dieser Fall für die Klimaanalyse von besonderem Interesse. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.5.4 zusammengefasst und werden im folgenden Absatz diskutiert:

Bei der Variante C=M konnte bei einer stufenweisen Veränderung der Wachstumsrate festgestellt werden, dass ausschließlich eine Hemmung der Wachstumsrate von Cercospora eindeutige Vorteile für Mehltau in der Etablierungsphase schafft. Es reichte dabei nicht aus, eine Reduzierung der Rate um 10 oder 20 % vorzunehmen. Mindestens 50 % bzw. eine Halbierung der Rate war notwendig, um einen Effekt zum Vorteil für Mehltau festzustellen. Dieser bezog sich ausschließlich auf die

Etablierungsphase. An das maximale Befallshäufigkeitsniveau von *Cercospora* konnte Mehltau jedoch nicht herankommen. Die Beobachtung des Vorsprungs zu Beginn der Epidemie wurde auch bei Verwendung der Wachstumsraten aus den Felddaten bestätigt.

Cercospora erfuhr in einem der beiden Versuchsreihen der Szenarien-Analyse für die Variante C=M, unter Annahme eines fördernden Konkurrenzkoefizienten ($\alpha_{CM} = -0,24$) in Kombination mit einer Variation der Wachstumsrate (Fall 2 und 3), eine leichte Zunahme in der maximalen Befallshäufigkeit und das obwohl die Situationen zu Ungunsten von *Cercospora* verändert wurden. Dieses Phänomen der Förderung entsprach der Beobachtung, welche auch bei der Modellierung der Interaktion von Septoria-Blattbräune und Mehltau an Weizen gemacht wurde (WEBER, 1992) und stellt somit eine Gemeinsamkeit der beiden Untersuchungsreihen dar.

Zusammenfassend kann für die Variante mit gleichzeitigem Inokulationszeitpunkt gesagt werden, dass Mehltau aus eigener Kraft keine Veränderung des Interaktionsverhältnisses schafft. Es muss eine Schwächung von *Cercospora* vorhanden sein, damit Mehltau überhaupt eine Chance erhält.

Ähnlich sah die Situation bei der Variante 1C2M aus. Auch hier brachte nur eine Halbierung der Rate von *Cercospora* eine Möglichkeit für Mehltau, einen Vorteil innerhalb der Beziehung der beiden Blattkrankheiten zu erlangen, die sich ebenfalls bei der Verwendung der Feldraten zeigte. In einem Szenario konnte Mehltau nicht nur einen erheblichen Vorsprung während der Etablierungsphase vorweisen, sondern auch in einer leicht überlegenen maximalen Befallshäufigkeit gegenüber dem perthotrophen Pilz (Abb. 50a, Nov_2011, Seite 163). Für die Veränderung der Wachstumsrate muss auch in dieser Variante zusammengefasst festgehalten werden, dass es nicht ausreicht, wenn Mehltau gestärkt aus dem Klimawandel hervorgeht. *Cercospora* muss gleichzeitig eine deutliche Schwächung erfahren, damit der biotrophe Pilz eine Chance erhält. Wenn dieser Fall eintritt, ist aber nicht nur ein Vorsprung wie bei C=M zu erwarten, sondern es kann auch eine Dominanz in der maximalen Befallshäufigkeit eintreten.

Bei Variante 1M2C wurde der einzige Fall beobachtet (Beispiel Mai_2012), in dem Mehltau über den gesamten Beobachtungszeitraum über *Cercospora* dominiert. Dieser ist in der Klimaanalyse von besonderem Interesse, weil sich Mehltau unter diesen Bedingungen anders verhält, als wenn nur zu Beginn der Epidemie ein Vorsprung in der Beziehung der beiden Blattkrankheiten vorhanden ist (Beispiel Nov_2012). In diesem Sonderfall musste in den betrachteten Szenarien erstmals auch eine Schwächung von Mehltau simuliert werden, damit überprüft werden konnte, wann *Cercospora* Vorteile aus der Interaktion zieht. Anders als in den Varianten C=M und 1C2M brachte nicht eine Reduzierung der Rate sondern die Verringerung der Kapazität von Mehltau eine Situation zu Gunsten von *Cercospora*. In diesem Fall bezog sich der Vorteil aber nicht auf einen Vorsprung in der Etablierungsphase, sondern die Modifikation nahm Einfluss auf die maximale Befallshäufigkeit. Dabei

ist zu berücksichtigen, dass eine Verringerung um 20 % ausreichen würde, um dieses Ziel zu erlangen. Eine Bevorteilung der schwächeren Blattkrankheit reicht auch in dieser Situation nicht aus, um das Interaktionsverhältnis zu wenden. Es muss eine Schwächung von Mehltau bzw. des stärkeren Interaktionspartners vorhanden sein. Erst dann kann Cercospora in der maximalen Befallshäufigkeit dominieren.

Im zweiten Versuch der Variante 1M2C dominierte zu Beginn der Epidemie Mehltau, dessen Position aber ab $t = 10$ bereits von Cercospora übernommen wurde und danach eine deutlich bessere Rolle in Bezug auf die Befallshäufigkeit innehatte. Die Szenarien-Analyse dieses Versuches zeigte die gleichen Ergebnisse, die zuvor auch in den Varianten C=M und 1C2M festgestellt wurden. Eine positive Entwicklung für Mehltau in der Interaktion ist nur durch eine Hemmung der Rate von Cercospora möglich.

Zusammenfassend kann für den Einfluss einer ausschließlichen Klimaerwärmung auf die Interaktion von Cercospora auf Mehltau gesagt werden, dass Mehltau nur durch die Hemmung von Cercospora in den Reihenfolgen 1C2M und C=M einen zeitlichen Vorsprung in der Etablierungsphase erfahren kann. Sie ist dann die dominierende Blattkrankheit zu Beginn der Saison. Im Laufe der Zeit wird sie jedoch von Cercospora abgelöst, die in den meisten Fällen das höchste maximale Befallshäufigkeitsniveau im Vergleich der beiden Krankheiten besitzt. Der festgestellt Wechsel in der Führungsposition der beiden Blattkrankheiten zwischen den verschiedenen Phasen des Beobachtungszeitraumes ergab sich auch bei der Verwendung der Wachstumsraten aus den Felddaten und bestätigte damit den großen Einfluss der Umweltparameter (z. B. die Witterung) auf die Interaktion.

Die Variante 1M2C muss in der Zusammenfassung dagegen etwas anders eingeschätzt werden. Mehltau erfährt durch den früheren Inokulationszeitpunkt einen deutlichen Vorteil, den er unter gewissen Voraussetzungen bis zum Ende der Saison behaupten kann. Cercospora kann in dieser Reihenfolge nur den besseren Rang in der maximal zu erreichenden Befallshäufigkeit erzielen. Zu Beginn der Epidemie bleibt Mehltau die führende Blattkrankheit, wenn sie die Wirtspflanze zuerst infiziert.

Der entscheidende Faktor für eine bessere Situation von Mehltau ist die Reduzierung der Wachstumsrate von Cercospora. Dieser Einfluss durch den Parameter ist aber nur möglich, weil der modifizierte Ansatz von WEBER (1992) eingesetzt wurde. Die Verwendung der $\max\{\dots\}$ -Funktion gibt der Rate die bestimmende Rolle in der Interaktion. Das gewählte LV-Modell nimmt somit großen Einfluss in der Szenarien-Analyse auf die zukünftige Bedeutung der beiden Blattkrankheiten.

Verbindet man nun die Ergebnisse der Klimaanalyse mit den Resultaten der Blattkrankheiten unter der Bedingung von steigenden Temperaturen ohne Einfluss des anderen Interaktionspartners, so müssen die zuvor beschriebenen Ergebnisse in Bezug auf die Klimaerwärmung differenziert betrachtet werden. Bei den unabhängigen Untersuchungen der beiden Blattkrankheiten in drei verschiedenen Temperaturstufen konnte festgestellt werden, dass der Einfluss der Temperatur die Wachstumsrate und die Kapazität betreffen können, hier aber unterschiedliche Schwerpunkte zu setzen sind, je nachdem ob die Befallshäufigkeit oder die Befallsstärke betrachtet werden. Die Ergebnisse der Solo-Varianten bei den verschiedenen Temperaturen wiesen tendenziell daraufhin, dass mit steigender Temperatur bis zum Temperaturoptimum die Wachstumsrate von *Cercospora* zunimmt. Dies würde für Mehltau in den Varianten 1C2M und C=M bedeuten, dass die Position von *Cercospora* gegenüber Mehltau in Zukunft gestärkt werden würde bzw. sich die Dominanz manifestiert. In der Variante 1M2C hätte Mehltau aufgrund des früheren Infektionszeitpunktes die einzige Chance über *Cercospora* zu dominieren. Da aber schon eine Verringerung um 20 % in der maximalen Befallshäufigkeit ausreicht, um Vorteile für *Cercospora* zu erzielen, hätte der biotrophe Pilz sicherlich die schlechtere Ausgangssituation. Mehltau könnte vielleicht noch zu Beginn der Epidemie eine etwas höhere Befallshäufigkeit in der Variante 1M2C aufweisen, danach würde aber *Cercospora* die Hauptrolle in der Interaktion übernehmen.

Gegen eine schlechtere Entwicklung von *Cercospora*, wie in der Szenarien-Analyse untersucht, spricht des Weiteren die Verknüpfung von Pilzbiologie und simulierter Temperaturerhöhung (Abschnitt 4.5.5, Seite 171). Die Verschiebung des derzeitigen Grenzbereiches der mittleren Monatstemperaturen auf das mögliche Temperaturintervall bei einer Klimaerwärmung um 3,5 °C zeigt, dass *Cercospora* aufgrund des kurzen Optimums im oberen Temperaturbereich (20 bis 30 °C) ihr Maximum bei der relativen Infektionswahrscheinlichkeit anstrebt. Für Mehltau (Optimum 15 bis 30 °C) ist in diesem Bereich eher eine leichte Abnahme der Infektionswahrscheinlichkeit zu beobachten. Demzufolge wird sich die Temperaturverschiebung stärker zu Gunsten von *Cercospora* bewegen als umgekehrt.

Die Szenarien-Analyse für Mehltau, die in dieser Arbeit betrachtet wurde, spiegelt aber nur den Zustand des zukünftigen Klimas wider, in der alleine die Temperatur durch die prognostizierte Erderwärmung beeinflusst wird. Ein zusätzlicher Klimafaktor wie die relative Luftfeuchtigkeit wird in dieser Betrachtungsweise nicht abgedeckt. Sollte es nämlich neben einer steigenden Temperatur ebenfalls trockenere Bedingungen geben, könnte sich dies aufgrund der Präferenz der beiden Blattkrankheiten vorteilhaft für Mehltau und negativ für *Cercospora* auswirken. Unter Annahme dieser kombinierten Klimakonstellation (warm und trocken) könnte der Fall Realität werden, bei dem unter der Bedingung einer reduzierten Wachstumsrate von *Cercospora* und einer gleichzeitigen

Förderung des Wachstums von Mehltau, der biotrophe Pilz gestärkt aus dem Klimawandel hervorgeht. Ein weiterer Faktor, der ebenfalls in dieser Konstellation positive Effekte für Mehltau auslösen könnte, ist die kürzere Inkubationszeit bei steigenden Temperaturen. Dieser Einflussfaktor unterstreicht die Dominanz von Mehltau zu Beginn einer Epidemie. Demzufolge könnte Mehltau in Zukunft die Krankheit werden, die eine Bekämpfungsentscheidung hervorruft und nicht mehr Cercospora. Es muss aber ganz klar gesagt werden, dass diese Situation nur möglich ist, wenn es neben einer Temperaturerhöhung auch zu trockeneren Umweltbedingungen kommt. Diese Voraussetzungen müssen nicht deutschlandweit und jedes Jahr vorhanden sein, sondern sie können sich auf bestimmte Regionen beschränken oder auch nur einzelne Jahre betreffen.

Cercospora behält aber vorerst die Rolle der dominierenden Blattkrankheit in Deutschland. Ihre Bedeutung darf nicht unterschätzt werden, auch nicht, wenn Mehltau insbesondere zu Beginn der Saison die dominierende Krankheit werden sollte. Zudem sollte bei trockeneren Witterungsbedingungen der Einsatz von Beregnung der Zuckerrübenfelder in Betracht gezogen werden (PIDGEON ET AL., 2004; SUPIT ET AL., 2012). Der Einsatz dieser technischen Mittel könnte die Ausgangsbedingungen erneut in Richtung dominierende Cercospora verschieben.

Des Weiteren sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu berücksichtigen, bei denen Cercospora in ihrer Ausbreitung durch eine Prädisposition von Mehltau eine Förderung erfahren kann. Dieser Aspekt, der sich in einem Fall der Klimaanalyse andeutungsweise zeigte (Abschnitt 4.5.1, Seite 151), könnte dann die Befallsituation mit Cercospora im Laufe der Saison weiter verschärfen und somit den gesamten Befallsdruck während der Anbausaison erhöhen.

5.6 Die Bewertung des Interaktionsmodells mit drei Blattkrankheiten

Das modifizierte LV-Modell mit drei Blattkrankheiten wurde in dieser Arbeit nur als theoretisches Modell betrachtet, da das erweiterte Versuchsdesign unter dieser Fragestellung den Rahmen der Arbeit gesprengt hätte. Die Ergebnisse des theoretischen Trio-Modells haben zwei Erkenntnisse geliefert. Die erste Feststellung bezieht sich auf die Verwendung des modifizierten LV-Modells. Dieses wird umso schwieriger je mehr Krankheiten in das Modell integriert werden müssen. Wie schon zu Beginn des Diskussionsteils erwähnt, ist die Schätzung von insgesamt 18 validen Parametern bei einem Interaktionsmodell für drei Blattkrankheiten kritisch zu beurteilen.

Die zweite Erkenntnis bezieht sich auf die festgestellte Rolle von Rost in der Trio-Variante. Das Modell bestätigte die aufgestellte Hypothese, dass Rost unter den vorausgesetzten Bedingungen in der Bedeutung hinter Cercospora und Mehltau anzusiedeln ist. Ursächlich kann hierfür die lange Inkubationszeit bei 25 °C verantwortlich gemacht werden. Rübenrost präferiert im Vergleich der drei Blattkrankheiten ein kühleres Temperaturoptimum. Unter den heutigen Klimabedingungen wie auch

unter der zu erwartenden zukünftigen Klimaerwärmung wird Rost in seiner Bedeutung eher ab- als zunehmen, wenn das heutige Anbausystem weiter fortgesetzt wird. Sollte es jedoch, wie in wärmeren Regionen bereits üblich (ROSSI ET AL., 1995; RUIZ-HOLST ET AL., 2003), zu einer Umstellung von der Sommerzuckerrübe (Saison März/April bis Oktober) zur Winterzuckerrübe kommen (Saison August bis Oktober), mit einer fast ganzjährigen Anbausaison wie in der Kultur Raps, könnte sich die Bedeutung der Zuckerrüben-Blattkrankheiten verschieben. Vorliegende Veröffentlichungen zeigen, dass die Winterzuckerrübe ein aktueller Forschungsschwerpunkt im deutschen Zuckerrübenanbau ist (KLUGE-SEVERIN ET AL., 2009; HOFFMANN & KLUGE-SEVERIN, 2011). Unter dieser Voraussetzung könnten Rost, wie auch andere Blattkrankheiten, die einen kühleren Temperaturbereich bevorzugen, z. B. Falscher Mehltau, in der Rolle der schädigenden Blattkrankheiten wichtiger werden und eine zusätzliche Herbstbehandlung mit Fungiziden notwendig machen. Folglich könnte sich die Problematik der Blattkrankheiten im Zuckerrübenanbau insgesamt verschärfen und den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln intensivieren. Um die Folgen des Winterzuckerrübenanbaus auf den Einfluss der Interaktion der Blattkrankheiten einzuschätzen, bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. Die Komplexität der Interaktion von Blattkrankheiten innerhalb dieses neuen Anbausystems wird allerdings mehr zu- als abnehmen und somit eine einfache und schnelle Antwort auf die Frage der Interaktion bzw. auf ihre Rolle in Bezug auf den Klimawandel nicht liefern können.

5.7 Fazit und Ausblick

Die Kombination aus Feld- und Klimaschrankversuchen hat gezeigt, dass in der Interaktion der Zuckerrüben-Blattkrankheiten *Cercospora* über Mehltau dominiert. Nicht nur die Dominanz in der Anzahl befallener Blätter und der Vorsprung in der Erstbesiedlung sprechen für *Cercospora*, sondern auch die hohe Befallshäufigkeit und Befallsstärke in den Interaktionsversuchen. Dabei scheint die Reihenfolge der Inokulation kaum Einfluss auf die Beziehung der beiden Blattkrankheiten zu nehmen. Einzig die Variante 1M2C zeigte, dass Mehltau durch die Primärinokulation Vorteile in der Etablierungsphase gegenüber *Cercospora* erhält. Im Gegensatz dazu steht das Merkmal der maximalen Befallshäufigkeit, bei dem in fast allen Situationen *Cercospora* über Mehltau dominierte. Die statistische Bewertung der Konkurrenzkoefizienten wie auch der Vergleich der *sAUDPC*-Werte bestätigten ein Interaktionsverhältnis zum Vorteil für *Cercospora*. Demzufolge kann von einem *Amensalismus* oder einer *indirekten einseitigen Konkurrenz* gesprochen werden.

Wie sich dieses Verhältnis in Bezug auf den Klimawandel verändern könnte, wurde in einer 3-stufigen Szenarien-Analyse mit einer Veränderung um jeweils 10, 20 und 50 % untersucht. Die Ergebnisse weisen daraufhin, dass Mehltau nur eine Chance in der Interaktion erhält, wenn *Cercospora* deutlich

in ihrem Wachstum gehemmt wird. Mehltau schafft es in dieser Beziehung nicht, aus eigener Kraft die dominierende Rolle zu übernehmen. Die Steigerung der Rate von *Cercospora* verbunden mit einer Temperaturerhöhung in Richtung Optimum, die bei den Untersuchungen ohne Interaktionspartner festgestellt wurden, sprechen jedoch gegen eine Veränderung des Interaktionsverhältnisses zu Gunsten des biotrophen Pilzes. Die Ergebnisse werden durch die Verknüpfung von Literaturdaten der Pilzbiologie und Klimadaten zur Temperaturerhöhung in einer theoretischen Analyse bestätigt, da beide Pilze durch die Klimaerwärmung eine Förderung erfahren werden und keiner der beiden geschwächt wird. Die einzige Situation, in der Mehltau einen Vorteil in der Interaktion erlangen könnten, ist die Kombination aus frühem Erstaufreten mit sehr trockenen Wetterbedingungen, bei denen *Cercospora* unterdrückt werden könnte. Diese Ereigniskombination betrifft in Zukunft aber sehr wahrscheinlich nur einzelne Jahre oder Standorte und wird an der Gesamtbedeutung der beiden Blattkrankheiten nicht viel ändern.

Die modellierten Interaktionen auf Basis der Befallshäufigkeit, die einen Teil der Ergebnisse dieser Arbeit darstellen, könnten in die Nutzung von Prognosemodellen einfließen. Bisher werden die vorhandenen Modell CERCBET und ERYBET unabhängig voneinander verwendet, d. h. die Blattkrankheit, die eine der drei Bekämpfungsschwellen aufweist (5-15-45 % Befallshäufigkeit), führt im Modell zum Auslösen der Bekämpfungsempfehlung. Mit dem Interaktionsmodell wäre es nun möglich, eine Verknüpfung der beiden Prognosemodelle vorzunehmen, sei es zum einen als zusätzlicher Faktor in der Bewertung der summarischen Bekämpfungsschwelle insbesondere für die dritte Stufe von 45 % (Auslösen einer Feldkontrolle), oder auch in der Abschätzung einer Bekämpfungsstrategie (Notwendigkeit einer Behandlung). Einen Verknüpfungspunkt könnte die mögliche Einbindung des Interaktionskoeffizienten darstellen, der die bisher unabhängigen Modelle miteinander verbindet. Die daraus resultierende Verzahnung der Modelle könnte auch in die Verwendung der Prognosemodelle zur Abschätzung des Auftretens der Blattkrankheiten unter zukünftigen Klimasimulationen einfließen. Diese Herangehensweise wurde bereits in einer ersten Untersuchung für das Teilmodell CERCBET1 (Erstaufreten von *Cercospora*) durchgeführt (RICHERZHAGEN ET AL., 2011). Weitere Modelle müssten in einer Einzelbetrachtung folgen. Im Anschluss an die unabhängige Simulation der verschiedenen Modelle könnte dann eine interagierende Bewertung aller Modelle mittels Interaktionsmodell angeschlossen werden.

Neben dieser ersten praktischen Anwendung des Interaktionsmodells sollten aber auch weitere offene Fragen, die während dieser Arbeit aufgetreten sind, untersucht werden. Hierbei ist von besonderem Interesse die Problematik des Inokulums (Qualität und Quantität). Dieses Merkmal zeigte in den eigenen Versuchen, aber auch bei WEBER (1992), dass zwischen einzelnen Versuchen

möglicherweise eine hohe Variabilität vorhanden ist, und damit ein enormer Einfluss auf das Interaktionsverhältnis genommen wird. Ein weiterer Punkt ist die Untersuchung der drei Interaktionsvarianten C=M, 1C2M und 1M2C bei verschiedenen Temperaturstufen. Diese Vorgehensweise war zuerst auch für diese Arbeit geplant, konnte aber, wegen der hierfür benötigten hohen Anzahl erforderlicher Versuchsdurchgänge (Zeitfaktor), die für eine solche Fragestellung benötigt werden, nicht durchgeführt werden. Vielleicht sollte man sich zunächst auf eine Krankheitsreihenfolge (z. B. 1C2M) spezialisieren und diese dann detailliert untersuchen, um im Anschluss mit den gewonnen Erkenntnissen die Untersuchungen in die Breite auszudehnen. Weitere interessante Aspekte, die einer genaueren Analyse unterzogen werden sollten, betreffen vor allem die Einflussfaktoren, die den Vergleich zwischen Freiland und Labor erschweren. Dazu gehören die Länge des Beobachtungszeitraumes, die große Effekte auf die Phasen der Infektkette nimmt oder auch weitere Wetterparameter wie Luftfeuchtigkeit und Regenereignisse, die gerade in Bezug auf Mehltau eine wichtige Rolle besitzen.

Die Interaktion ist ein vielschichtiges und hochkomplexes System, dessen Umfang immer größer wird, je weiter man darin vordringt. Für zukünftige Untersuchungen sind aus diesem Grund genügend Fragestellungen vorhanden, deren Beantwortung eine Herausforderung für weitere Interaktions-Studien sein wird.

III. Literaturverzeichnis

- AGRIOS, G.N. (2005): Plant Pathology. 5 ed. Elsevier Academic Press. London, 922
- AL-NAIMI, F.A., GARRETT, K.A. & BOCKUS, W.W. (2005): Competition, facilitation, and niche differentiation in two foliar pathogens. *Oecologia*, 143, 449-457
- ALLEN, M.F., SWENSON, W., QUEREJETA, J.I., EGERTON-WARBURTON, L.M. & TRESEDER, K.K. (2003): Ecology of mycorrhizae: A conceptual framework for complex interactions among plants and fungi. *Annual Review of Phytopathology*, 41, 271-303
- ANDEREGG, W.R.L., PRALL, J.W., HAROLD, J. & SCHNEIDER, S.H. (2010): Expert credibility in climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 12107-12109
- ANONYMUS (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel - vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 78
- ANONYMUS (2010a): Abschlussbericht Projekt 01HS085 „Integrierte Bekämpfung der Zuckerrübenkrankheiten Mehltau, Rost und Ramularia“. ZEPP, IfZ, ISIP, Bad Kreuznach, 62
- ANONYMUS (2010b): Abschlussbericht: Klimawandel in Nordrhein Westfalen - Auswirkungen auf Schädlinge und Pilzkrankheiten wichtiger Ackerbaukulturen. proPlant Gesellschaft für Agrar- und Umweltinformatik mbH, Münster, 110
- ANONYMUS (2011): Zucker in Zahlen 2011. Wirtschaftliche Vereinigung Zucker, Bonn, 23
- AUST, H.J., BUCHENAUER, H., KLINGAUF, F., NIEMANN, P., PÖHLING, H.M. & SCHÖNBECK, F. (1991): Glossar Phytomedizinischer Begriffe. Ulmer. Stuttgart
- AUST, H.J. & V. HOYNINGEN-HUENE, J. (1986): Microclimate in relation to epidemics of powdery mildew. *Annual Review of Phytopathology*, 24, 491-510
- BEHN, A., BORNEMANN, K. & VARRELMANN, M. (2011): Werden Rübenkrankheiten aggressiver? *dlz agrarmagazin*, 3, 78-81
- BLEIHOLDER, H. & WELTZIEN, H.C. (1972a): Beiträge zur Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. an Zuckerrüben, I. Die Inkubations- und die Fruktifikationszeit. *Phytopathologische Zeitschrift*, 72, 344-353
- BLEIHOLDER, H. & WELTZIEN, H.C. (1972b): Beiträge zur Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. an Zuckerrüben, II. Die Konidienbildung in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Licht. *Phytopathologische Zeitschrift*, 73, 46-68
- BLEIHOLDER, H. & WELTZIEN, H.C. (1972c): Beiträge zur Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. an Zuckerrüben, III. Geopathologische Untersuchungen. *Phytopathologische Zeitschrift*, 73, 93-114
- BONFANTE, P. & ANCA, I.A. (2009): Plants, mycorrhizal fungi, and bacteria: a network of interactions. *Annual Review of Microbiology*, 63, 363-383
- BRAUN, P. (2000): Die vergleichende Validierung quantitativer Modelle von Pflanzengemeinschaften. Habilitation, Justus-Liebig-Universität Giessen, 145
- BSA (2007): Beschreibende Sortenliste 2007 - Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln). Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH. Hannover
- BSA (2011): Beschreibende Sortenliste 2011 - Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Bundessortenamt. Hannover
- BYFORD, W.J. (1996): A survey of foliar diseases of sugar beet and their control in Europe, *Proceedings of the 59th IIRB Congress*, Brussels, 1-10
- CAMPBELL, C.L. & MADDEN, L.V. (1990): Introduction to Plant Disease Epidemiology. John Wiley & Sons. New York
- CHAKRABORTY, S. & DATTA, S. (2003): How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO₂ under a changing climate? *New Phytologist*, 159, 733-742
- CHUPP, C. (1953): A monograph of the fungus genus *Cercospora*. Ithaca, NY, 677
- CONNELL, J.H. (1983): On the prevalence and relative importance of interspecific competition - evidence from field experiments. *American Naturalist*, 122, 661-696

- COOK, J., NUCCITELLI, D., GREEN, S.A., RICHARDSON, M., WINKLER, B., PAINTING, R., WAY, R., JACOBS, P. & SKUCE, A. (2013): Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 8, 024024
- DALUZ, W.C. & BERGSTROM, G.C. (1987): Interactions between *Cochliobolus-sativus* and *Pyrenophora-tritici-repentis* on wheat leaves. *Phytopathology*, 77, 1355-1360
- DAUB, M.E. & CHUNG, K.-R. (2009): Photoactivated Perylenequinone Toxins in Plant Pathogenesis. In *Plant relationships; The Mycota ; 5*, edited by ESSER, K, DEISING, HB. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 201-219
- DE BARY, A. (1879): Die Erscheinung der Symbiose. Vortrag gehalten auf der Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Cassel. Trübner, 30
- DE JESUS, W.C., DO VALE, F.X.R., COELHO, R.R., HAU, B., ZAMBOLIM, L., COSTA, L.C. & BERGAMIN, A. (2001): Effects of angular leaf spot and rust on yield loss of *Phaseolus vulgaris*. *Phytopathology*, 91, 1045-1053
- DRANDAREVSKI, C.A. (1969a): Untersuchungen über den echten Rübenmehltau *Erysiphe betae* (Vanha) Weltzien I. Morphologie und Taxonomie des Pilzes. *Phytopathologische Zeitschrift*, 65, 54-68
- DRANDAREVSKI, C.A. (1969b): Untersuchungen über den echten Rübenmehltau *Erysiphe betae* (Vanha) Weltzien II. Biologie und Klimaabhängigkeit des Pilzes. *Phytopathologische Zeitschrift*, 65, 124-154
- DRANDAREVSKI, C.A. (1969c): Untersuchungen über den echten Rübenmehltau *Erysiphe betae* (Vanha) Weltzien III. Geophytopathologische Untersuchungen. *Phytopathologische Zeitschrift*, 65, 201-218
- DWD (2012): Klimadaten Deutschland - Zeitreihen von Gebietsmitteln (Ausgabe der Mittelwerttemperatur von 1891-2011), Excel-Tabelle, Deutscher Wetterdienst (DWD) 1996-2012, Offenbach
- EL-FIKI, A.I.I., MOHAMED, F.G. & EL-MANSOUB, M.M.A. (2007): Studies on sugar beet rust disease in Egypt I: disease control and some vital activities of infected sugar beet plants grown under greenhouse conditions. 11th Congress of Phytopathology, Giza, Egypt, November 2007, 25-39
- FEINDT, F., MENDGEN, K. & HEITEFUSS, R. (1981): Der Einfluß der Spaltöffnungsweite und des Blattalters auf den Infektionserfolg von *Cercospora beticola* bei Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) unterschiedlicher Anfälligkeiten. *Phytopathologische Zeitschrift*, 101, 281-297
- FRANCIS, S. (2002): Sugar-beet powdery mildew (*Erysiphe betae*). *Molecular Plant Pathology*, 3, 119-124
- FUCHS, J., STOCKFISCH, N. & MÄRLÄNDER, B. (2008): Entwicklung und Variation der Leistung von Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Anbaumanagement und Sorte. *Pflanzenbauwissenschaften*, 12, 69-77
- GARRETT, K.A., DENDY, S.P., FRANK, E.E., ROUSE, M.N. & TRAVERS, S.E. (2006): Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, 44, 489-509
- GLAWE, D.A. (2008): The powdery mildews: A review of the world's most familiar (yet poorly known) plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 46, 27-51
- HARROWER, K.M. (1978): Effects of mixed inocula of *Leptosphaeria nodorum* and *Septoria triticion* wheat seedlings. *Transactions of the British Mycological Society*, 70, 41-45
- HAU, B. (2001): Some remarks on the interactions among diseases with respect to their dynamics and crop losses. 8th International Workshop on Plant Disease Epidemiology, Ouro Preto, Brasil, 110-119
- HEITEFUSS, R., KÖNIG, K., OBST, A. & RESCHKE, M. (2000): Pflanzenkrankheiten und Schädlinge im Ackerbau. VerlagsUnion Agrar. Frankfurt am Main, 165
- HOFFMANN, C.M. & KLUGE-SEVERIN, S. (2011): Growth analysis of autumn and spring sown sugar beet. *European Journal of Agronomy*, 34, 1-9
- HOFFMANN, G.M., NIENHAUS, F., POEHLING, H.M., SCHÖNBECK, F., WELTZIEN, H.C. & WILBERT, H. (1994): Lehrbuch der Phytomedizin. 3 ed. Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin

- HORBACH, R., NAVARRO-QUESADA, A.R., KNOGGE, W. & DEISING, H.B. (2011): When and how to kill a plant cell: Infection strategies of plant pathogenic fungi. *Journal of Plant Physiology*, 168, 51-62
- JACOB, D., BÜLOW, K., KOTOVA, L., MOSELEY, C., PETERSEN, J. & RECHID, D. (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. CSC Report. Max-Planck-Institut für Meteorologie, 6, Hamburg, 51
- JARVIS, W.R., GUBLER, W.D. & GROVE, G.G. (2002): Epidemiology of powdery mildews in agricultural pathosystems. In *The Powdery Mildews A Comprehensive Treatise*, edited by BÉLANGER, RR, BUSHNELL, WR, DIK, AJ, CARVER, TLW. St. Paul, Minnesota, 169-199
- JOHNSON, K.B. (1990): Assessing multiple pest populations and their effects on crop yield. International Workshop on Crop Loss Assessment to Improve Pest Management in Rice and Rice-based Cropping Systems in South and Southeast Asia 11-17 October 1987, Manila, 203-213
- JONES, D.G. & ODEBUNMI, K. (1971): Epidemiology of *Septoria tritici* and *S. nodorum* 5. Effect of mixed inocula on disease symptoms and yield in 2 spring wheat varieties. *Transactions of the British Mycological Society*, 57, 153-159
- JÖRG, E. (1987): Synökologische Untersuchung über Wechselwirkungen im Agrarökosystem Winterweizen. Dissertation, Justus-Liebig-Universität, 315
- JÖRG, E. & KRAUTHAUSEN, H.J. (1996): Bekämpfung von *Cercospora beticola* an Zuckerrüben. *Mitt. Biol Bundesanst. Land - Forstwirtschaft*, 321, 185
- KAISER, U. (2007): Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. und Befalls-Verlust-Relationen bei Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) in Abhängigkeit von der Anfälligkeit von Sorten und Konsequenzen für sortenspezifische Bekämpfungsschwellensysteme. Dissertation, Universität Göttingen, 139
- KAISER, U., ROSSNER, H., VARRELMANN, M. & MARLANDER, B. (2007): Reaction of sugarbeet varieties with different susceptibility to the infestation with *Cercospora beticola*. *Sugar Industry*, 132, 183-194
- KIESSLING, U. & HOFFMANN, G.M. (1985): Interactions between powdery mildew and brown leaf rust on barley under epidemiological aspects. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 92, 396-406
- KLUGE-SEVERIN, S., HOFFMANN, C. & MARLANDER, B. (2009): Yield and quality of winter beets - Prospects for sugarbeet production? *Sugar Industry*, 134, 366-376
- KLUGE, E., ENZIAN, S. & GUTSCHE, V. (1999): Atlas der potentiellen Befallsgefährdung durch wichtige Schadorganismen im Ackerbau Deutschland. Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin und Braunschweig. Braunschweig
- KONTRADOWITZ, L. & VERREET, J.A. (2010): Assessment of resistance and virulence in the pathosystem sugar beet (*Beta vulgaris*) /powdery mildew (*Erysiphe betae*) - development of basics for an effective powdery mildew resistance breeding. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117, 49-54
- LADEWIG, E., BRUNS, C., LEIPERTZ, H., SANDER, G. & WETZLER, H. (2007): Expertenbefragung zum Pflanzenschutz 1994-2005. *Sugar Industry*, 132, 260-265
- LANG, C. (2005): Control of leaf diseases: Monitoring, control thresholds and practical application. *Sugar Industry*, 130, 388-396
- LEHMANN, H., MÜSCHEN, K., RICHTER, S. & MÄDER, C. (2013): Und sie erwärmt sich doch - Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel? 1. Auflage ed. Dessau, 122
- LENZ, R. (2002): Entwicklung von biologisch-epidemiologisch und ökonomisch begründeten Bekämpfungsschwellen gegen *Erysiphe betae* und *Ramularia beticola* in der Zuckerrübenkultur. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel
- LI, J., WANG, M.-H. & HO, Y.-S. (2011): Trends in research on global climate change: A science citation index expanded-based analysis. *Global and Planetary Change*, 77, 13-20
- LOTKA, A. (1925): Elements of physical biology. Williams & Wilkins Co. Baltimore

- MADARIAGA, B.R. & SCHAREN, A.L. (1986): Interactions of *Puccinia-striiformis* and *Mycosphaerella graminicola* on wheat. *Plant Disease*, 70, 651-654
- MADDEN, L.V., PIRONE, T.P. & RACCAH, B. (1987): Temporal analysis of two viruses increasing in the same tobacco fields. *Phytopathology*, 77, 974-980
- MÄRLÄNDER, B., HOFFMANN, C., KOCH, H.J., LADEWIG, E., MERKES, R., PETERSEN, J. & STOCKFISCH, N. (2003): Environmental situation and yield performance of the sugar beet crop in Germany: Heading for sustainable development. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189, 201-226
- NEWTON, M. & PETURSON, B. (1943): *Uromyces betae* in Canada. *Phytopathology*, 33, 10
- NGUGI, H.K., KING, S.B., HOLT, J. & JULIAN, A.M. (2001): Simultaneous temporal progress of sorghum anthracnose and leaf blight in crop mixtures with disparate patterns. *Phytopathology*, 91, 720-729
- NOLAN, S., COOKE, B.M. & MONAHAN, F.J. (1999): Studies on the interactions between *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum* in wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 105, 917-925
- O'SULLIVAN, E. (1997): Responses of sugar-beet cultivars to the control of rust (*Uromyces betae*). *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 36, 175-184
- ODUM, E.P. & OVERBECK, J. (1999): *Ökologie. Grundlagen, Standorte, Anwendung*. 3. ed. Thieme. Stuttgart, 471
- OLESEN, K. (2005): Fungal manipulation of host defences in plants. Induced resistance and susceptibility against the powdery mildew fungus (*Blumeria graminis*) in cereals. Dissertation, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen
- PIDGEON, J.D., JAGGARD, K.W., LISTER, D.H., RICHTER, G.M. & JONES, P.D. (2004): Climatic impact on the productivity of sugarbeet in Europe. *Sugar Industry*, 129, 20-25
- PORTER, C. & CARTER, J. (1938): Competition among fungi. *The Botanical Review*, 4, 165-182
- RACCA, P., JÖRG, E., MITTLER, S. & PETERSEN, J. (2002): Blattkrankheiten bei Zuckerrüben - Prognoseansätze zur Optimierung des Fungizideinsatzes. *Sugar Industry*, 127, 949-958
- RÄDER, T. (2002): Epidemiologische Untersuchung zum Rübenrost (*Uromyces betae* (Pers.) Lév). Dipl.-Arbeit, Universität Hohenheim, 119
- RASMUSSEN, G. (1992): *Ramularia beticola* og *Uromyces betae* i bederoer: herunder mulige interaktionsmekanismer. Den kgl. Veterinær- og Landbohøjskole, Institut for Plantebiologi, Sektion for Plantepatologi
- RICHERZHAGEN, D., RACCA, P., ZEUNER, T., KUHN, C., FALKE, K. & HAU, B. (2011): Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of *Cercospora* leaf spot in Lower Saxony. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118, 167-177
- RICHTER, O., KUNISCH, M. & KOCH, W. (1988): Mathematische Modelle für die Konkurrenz zwischen Pflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XI*, 123-129
- RIECKMANN, W. & STECK, U. (1995): *Krankheiten und Schädlinge der Zuckerrübe*. Verlag Th. Mann. Gelsenkirchen, 196
- ROßBERG, D., VASEL, E.-H. & LADEWIG, E. (2010): NEPTUN 2009 - Zuckerrüben. *Berichte aus dem Julius-Kühn-Institut* 152, 45
- ROSSI, V., RACCA, P. & GIOSUÈ, S. (1995): Geophytopathological analysis of *Cercospora* leaf spot on sugarbeet in the Mediterranean area. *Phytopath. Medit.*, 34, 69-82
- ROUND, P.A. & WHEELER, B.E.J. (1978): Interactions of *Puccinia hordei* and *Erysiphe graminis* on seedling barley. *Annals of Applied Biology*, 89, 21-35
- RUIZ-HOLST, M., MARTIN, F.D., BURBA, M., ELIAS, P.D.Y. & DIENER, G. (2003): Assessment of the technical quality of sugarbeet in Southern Spain. *Sugar Industry*, 128, 879-887
- RUPPEL, E.G. & TOMASOVIC, B.J. (1977): Epidemiological factors of sugar-beet powdery mildew. *Phytopathology*, 67, 619-621
- RUSSELL, G.E. (1970): Interactions between diseases of sugar beet leaves. *N.A.A.S. Quarterly Review*, 87, 132-138
- SCHOENER, T.W. (1983): Field experiments on interspecific competition. *American Naturalist*, 122, 240-285

- SIMKIN, M.B. & WHEELER, B.E.J. (1974): Effects of dual infections of *Puccinia hordei* and *Erysiphe graminis* on barley, cv zephyr. *Annals of Applied Biology*, 78, 237-250
- SØRENSEN, F. & MARCUSSEN, C. (1996): Rust *Uromyces betae* in Denmark, inoculum sources and effect on sugar beet yield, *Proceedings of the 59th IIRB Congress*, 119-128
- SPADAFORA, V.J. & COLE, H. (1987): Interactions between *Septoria nodorum* leaf blotch and leaf rust on soft red winter-wheat. *Phytopathology*, 77, 1308-1310
- STANHILL, G. (2001): The growth of climate change science: A scientometric study. *Climatic Change*, 48, 515-524
- SUPIT, I., VAN DIEPEN, C.A., DE WIT, A.J.W., WOLF, J., KABAT, P., BARUTH, B. & LUDWIG, F. (2012): Assessing climate change effects on European crop yields using the crop growth monitoring system and a weather generator. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 96-111
- TOWNSEND, C.R., BEGON, M., HARPER, J.L. & HOFFMEISTER, T.S. (2009): *Ökologie*. 2. Aufl. ed. Springer. Berlin, XVIII, 622
- UPHOFF, H. (2011): Breeding sugarbeet varieties with reduced susceptibility to foliar diseases. *Sugar Industry*, 136, 35-40
- VAHRENHOLT, F. & LÜNING, S. (2012): Die kalte Sonne. warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet. 2. Aufl. ed. Hoffmann und Campe. Hamburg, 444 S.
- VEREIJSEN, J. (2004): Cercospora leaf spot in sugar beet. Dissertation, Universität Wageningen, 198
- VOLLMER, J.H. (2005): Interactions between fungal plant pathogens on leaves - Especially simultaneous development of *Rhynchosporium secalis* and *Drechslera teres* on barley. Dissertation, Universität Roskilde (DK), 114
- VOLTERRA, V. (1926): Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. *Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei. Ser. VI*, 2, 31-113
- WEBER, G.E. (1992): Interaktionen zwischen *Erysiphe graminis* f.sp. tritici, *Septoria nodorum* sowie *Pseudocercospora herpotrichoides* im Agroökosystem Winterweizen und deren Modellierung. Dissertation, Universität Gießen, 98
- WEBER, G.E. (1996): Modelling interactions between epidemics of *Erysiphe graminis* and *Septoria nodorum* on wheat. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 103, 364-376
- WEILAND, J. & KOCH, G. (2004): Sugarbeet leaf spot disease (*Cercospora beticola* Sacc.). *Molecular Plant Pathology*, 5, 157-166
- WEINDLING, R. (1938): Association effects of fungi. *The Botanical Review*, 4, 475-496
- WEIß, D. (2004): Die Sanguinarin-Reduktase - ein neues Redoxenzym mit essentiellen Funktionen in Metabolismus und Kompartimentierung der Benzophenanthridine in Zellsuspensionen von *Eschscholzia californica* Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 122
- WELTZIEN, H.C. & AHRENS, W. (1977): Sind Ertragssteigerungen durch Bekämpfung des echten Mehltaus der Zuckerrübe (*Erysiphe betae*) möglich? *Zucker*, 30, 288-291
- WIBE, O. & MORTON, D.J. (1962): Inhibition of *Septoria passerinii* development in excised barley leaves by *Helminthosporium sativum* and by cell-free filtrates. *Phytopathology*, 52, 373-375
- WOLF, P.F.J. (2001): Über die Integration von Bekämpfungsmaßnahmen gegen pilzliche Blattkrankheiten der Zuckerrübe. IPS (Integriertes Pflanzenschutz-System) - Modell Zuckerrübe. Habilitation, Christian-Albrecht Universität zu Kiel, 258
- YARWOOD, C.E. (1957): Powdery mildews. *The Botanical Review*, 23, 235-301
- YARWOOD, C.E. (1959): Predisposition. In *Plant Pathology. An Advanced Treatise*, edited by HORSFALL, JG, COWLING, EB. New York: Academic Press, 521-562
- ZEBISCH, M., GROTHMANN, T., SCHRÖTER, D., HASSE, C., FRITSCH, U. & CRAMER, W. (2005): Climate change in Germany vulnerability and adaption of climate sensitive sectors. *Umweltbundesamt Dessau*, 205

IV. Anhang

Erklärung

Hierdurch erkläre ich, dass ich meine Dissertation mit dem Titel „Untersuchungen zum Auftreten und der Interaktion von Zuckerrüben-Blattkrankheiten am Beispiel von Cercospora-Blattflecken (*Cercospora beticola*), Rübenmehltau (*Erysiphe betae*) und Rübenrost (*Uromyces betae*) unter dem Einfluss des Klimawandels“ selbständig verfasst und die benutzten Hilfsmittel und Quellen sowie gegebenenfalls die zu Hilfeleistungen herangezogenen Institutionen vollständig angegeben habe.

Die Dissertation wurde nicht schon als Masterarbeit, Diplomarbeit oder andere Prüfungsarbeit verwendet.

Gensingen, den 5.12.2012

Dominique Richerzhagen

Danksagung

Nach Fertigstellung meiner Dissertation möchte ich mich bei allen recht herzlich bedanken, die mich bei der Durchführung und Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben:

Herrn Prof. Dr. B. Hau danke ich für die Überlassung des Themas und die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, die trotz der großen Entfernung zwischen Hannover und Bad Kreuznach sehr gut gelungen ist. Vielen Dank auch für die Hinweise, Anregungen und kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr. A. von Tiedemann möchte ich danken für die Übernahme des Koreferates.

Ein ganz besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern der ZEPP insbesondere dem Geschäftsführer Herrn Dr. Benno Kleinhenz und Herrn Dr. Paolo Racca, die mich nicht nur ausgezeichnet betreut und unterstützt haben, sondern denen ich auch meine fachliche, berufliche und persönliche Weiterentwicklung verdanke. Nicht weniger zu danken gilt es den technischen Assistentinnen Conny Braun, Jacqueline Hornung und Birgit Breckheimer für die Betreuung der Versuche sowie Dr. Jeanette Jung, Christian Kuhn und Beate Tschöpe für die moralische Unterstützung, die kritische Durchsicht und die vielen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Außerdem bedanken möchte ich mich beim Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, welches im Rahmen des KLIFF-Projektes diese Arbeit finanziell unterstützt hat.

Zum Schluss möchte ich meinem Freund Christian Kreul und meinen Eltern danken, die mich die ganze Zeit bedingungslos unterstützt haben und immer an das Ziel geglaubt haben.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Dominique Richerzhagen
Geburtsdatum, -ort: 18.11.1982, Köln
Familienstand: ledig
Nationalität: Deutsch

Schul Ausbildung

08.1989 – 07.1993 Städt. Kath. Grundschule Köln-Longerich

08.1993 – 06.2002 Gymnasium Köln-Pesch,
Abschluss: Abitur

Praktika

09.2002 – 08.2003 Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, Wesseling

04.2007 – 09.2007 Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und
Programm im Pflanzenschutz (ZEPP), Bad Kreuznach

Studium

10.2003 – 01.2009 Studium der Agrarwissenschaften an der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Studienrichtung: Pflanzenwissenschaften
Abschluss: Dipl.-Ing. agr.
Diplomarbeit: Wirksamkeit von Insektiziden auf den Kartoffelkäfer
(*Leptinotarsa decemlineata*) am Beispiel von Populationen aus
Deutschland

01.2010 – 12.2012 Anfertigung einer Dissertation
am Institut für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
als externe Doktorandin
Durchführung bei der ZEPP in Bad Kreuznach
seit 04.2012 Promotionsstudium der Gartenbauwissenschaften an der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

berufliche Tätigkeit

02.2009 – 12.2009 Projektmitarbeiterin
Parametrisierung und Validierung von Prognosemodellen
ZEPP, Bad Kreuznach

01.2010 – 12.2012 wissenschaftliche Mitarbeiterin,
Modellierung von Pathogenen und Schadinsekten
Verbundprojekt: Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIFF)
Institut für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover