

MODELLIERUNG

VOM WETTER ZUM MODELL

Wird von Modellen im Bereich Pflanzenproduktion und insbesondere im integrierten Pflanzenschutz gesprochen, so beziehen sich diese auf den Studienzweig der Epidemiologie und der Populationsdynamik.

Das Wort Epidemiologie leitet sich vom griechischen „epi“ ab und bedeutet „ab, was“; „auf, unter“. „Demos“ bedeutet „Menschen“ und „Logos“ kann mit „Studieren“ übersetzt werden. Epidemiologie bedeutet also wörtlich „das Studium dessen, was die Menschen betrifft“. Die Verwendung des Begriffs im Bereich der Pflanzenproduktion führt in die „botanische Epidemiologie“ oder „Pflanzenkrankheitsepidemiologie“ ein.

Unter Populationsdynamik versteht man die Veränderung der Größe, aber auch der räumlichen Verbreitung biologischer Populationen über kürzere oder längere Zeiträume.

Die Epidemiologie von Pflanzen-

krankheiten und die Populationsdynamik sind multidisziplinäre Ansätze, die biologische, statistische, agronomische und ökologische Kenntnisse erfordern.

Die Biologie ist notwendig, um den Krankheitserreger, seinen Lebenszyklus und die Physiologie der Kulturpflanze sowie die Interaktion des Krankheitserregers mit dieser zu verstehen.

Agronomische Praktiken können das Auftreten von Krankheiten positiv oder negativ beeinflussen.

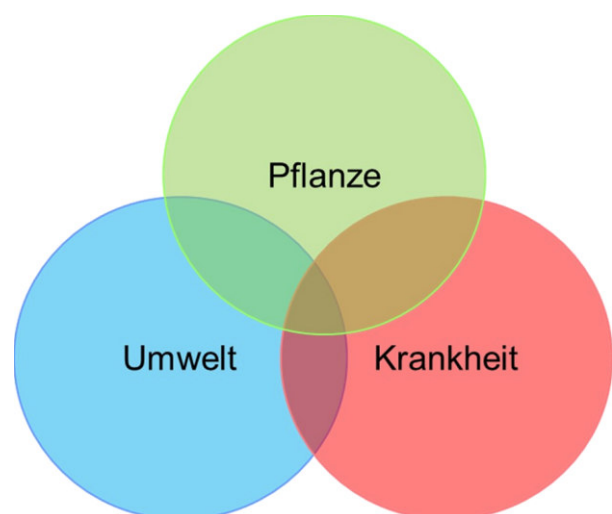
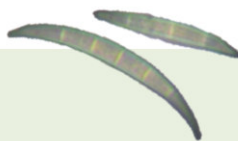


Abb. 16: Das Krankheitsdreieck

Ökologische Einflüsse sind zahlreich, beispielsweise können Unkrautarten als Reservoir für Schaderreger dienen, die Krankheiten in Kulturpflanzen verursachen.

Eine gängige Darstellung der drei Elemente einer Epidemie ist das „Krankheitsdreieck“: ein anfälliger Wirt, ein Schaderreger und günstige Wetterbedingungen für das Auftreten und den Verlauf der Krankheit (Abb. 16).

Sind nicht alle Elemente, vorhanden, kann eine Krankheit nicht auftreten.



Beispiel 1:

Ein mit Winterweizen bestellter Schlag weist Maisrückstände auf, die mit dem Pilz *Fusarium graminearum* infiziert sind. Ist das Wetter zu trocken und es mangelt an Niederschlag und Blattnässe, bilden die Fruchtkörper (Perithezien) des Pilzes keine Ascosporen auf den Ernterückständen oder können diese nicht freisetzen. Es kommt folglich nicht zur Infektion des Weizenbestandes.



Beispiel 2:

Die Kirschessigfliege benötigt reife, weiche Früchte (bevorzugt Beeren) für die Eiablage. Sind diese nicht ausreichend vorhanden, gerät die Populationsentwicklung ins Stocken.

Mit anderen Worten: für das Auftreten und die Weiterentwicklung einer Krankheit oder eines Schädling müssen alle drei Elemente gleichzeitig und am selben Ort vorhanden sein.

Da die epidemische Entwicklung ein „dynamischer“ Prozess ist, musste ein viertes Element in das Krankheitsdreieck eingefügt werden: die Zeit.

Die Zeit beeinflusst die Entwicklung der Krankheit und des Schädling sowohl kurz- als auch langfristig. Als kurzer Zeitraum für Pilzkrankheiten wird die Zeit angesehen, die eine einzelne Spore benötigt, um eine erfolgreiche Infektion zu etablieren. Während der gesamte Krankheitszyklus den langen Zeitraum repräsentiert und in Latenz-, Inkubations- und die infektiöse Zeit zusammengefasst werden kann.

Als kurzer Zeitraum wird bei Insekten die Zeit angesehen, die ein einzelnes Stadium benötigt, um sich ins nächste Stadium umzuwandeln (z.B. Puppe – Adulte). Während der lange Zeitraum die gesamte Populationsentwicklung repräsentiert.

Nach dieser eher trockenen Einführung folgt nun eine Beschreibung, wie die Modellierung in der Realität und hinter den Kulissen abläuft.

„Houston, we’ve had a problem“

Jack Swigert

14.04.1970, 55 Stunden und 54 Minuten nach dem Start, über 300.000 km von der Erde entfernt, explodierte einer der beiden Tanks mit superkritischem Sauerstoff im Servicemodul des Apollo 13 Raumschiffs „Odyssey“.

Kapselpilot John L. „Jack“ Swigert meldete über Funk: „Okay Houston, we’ve had a problem here.“ „Okay, Houston, wir haben hier gerade ein Problem gehabt.“

Astronaut Jack R. Lousma, im Kontrollzentrum in Houston fragte nach: „Könntet ihr das bitte wiederholen?“

Daraufhin meldete sich Kommandant Lovell und wiederholte: „Houston, we’ve had a problem.“

So beginnt normalerweise die Arbeit an einem neuen Modell: einer oder mehrere unserer „Apollo 13“-Pflanzenschutzdienste (PSD) der Länder signalisieren ein neues (oder bekanntes) Problem in Bezug auf einen Schaderreger in einer Kultur.

„Same procedere as every year“

Miss Sophie

Damit startet ein Arbeitsprozess, der die gesamte Struktur der ZEPP umfasst, bis hin zum Beginn einer „Wiederherstellungsmission“ für die PSD, die in unserem Fall die Entwicklung eines neuen Entscheidungshilfesystems (EHS oder engl.: Decision support system - DSS) darstellt.

Ein Modellierungsprozess beginnt mit einer einfachen Denkweise namens „Systemanalyse“, die in moderner Terminologie aus einem neuronalen Netzwerk besteht, das auf Regeln basiert, die vereinfacht nach dem in Abb. 17 dargestellten Schema neu angenommen werden.

Am Ende entwickelt sich die Systemanalyse zu einem Flussdiagramm, in dem der Schädlings- (und Kultur-) Zyklus im Wesentli-

chen mit fünf traditionellen Elementen dargestellt wird (Tab.1, Abb. 18.)

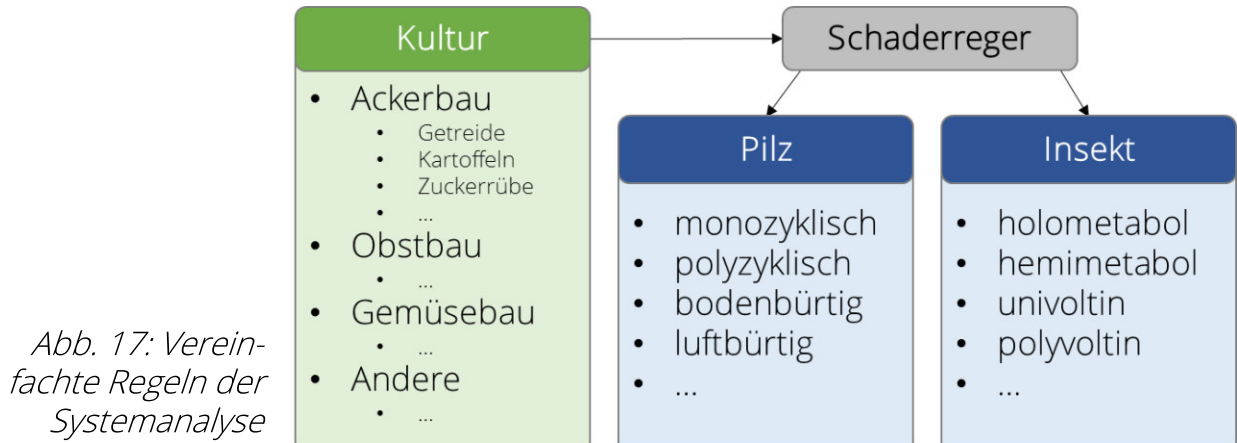



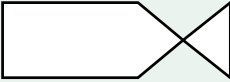
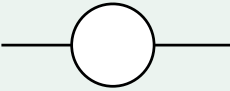
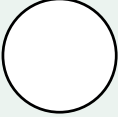


Abb. 17: Vereinfachte Regeln der Systemanalyse

Tab. 1: Die konventionellen Teile und ihre dargestellten Symbole, die bei der Konstruktion der Pathosystemanalyse verwendet werden

	Zustandsvariablen, wie die Anzahl der Sporen, die Menge an infiziertem Wirtsgewebe usw.
	Fluss und Richtung der Änderung einer Zustandsvariable in eine andere Zustandsvariable (Beispiel von latentem Krankheitsbereich zu sichtbarem Krankheitsbereich)
	Zustandsvariable, die eine nicht messbare Senke darstellt (Beispiel: Menge des Inokulums)
	Zustandsänderungsvariable: Sie gibt die Rate an, mit der sich eine Zustandsvariable ändert. Sie hängt von anderen Zustandsvariablen und Parametern ab
	Konstante oder Parameter: Sie sind externe Faktoren, die das System beeinflussen und nicht durch den Prozess innerhalb des Systems beeinflusst werden (Beispiel die meteorologischen Parameter)
	Hilfs- oder Zwischenvariablen als treibende Variablen im Informationsfluss (Beispiel Latenzzeit, berechnete Blattnässe etc.)

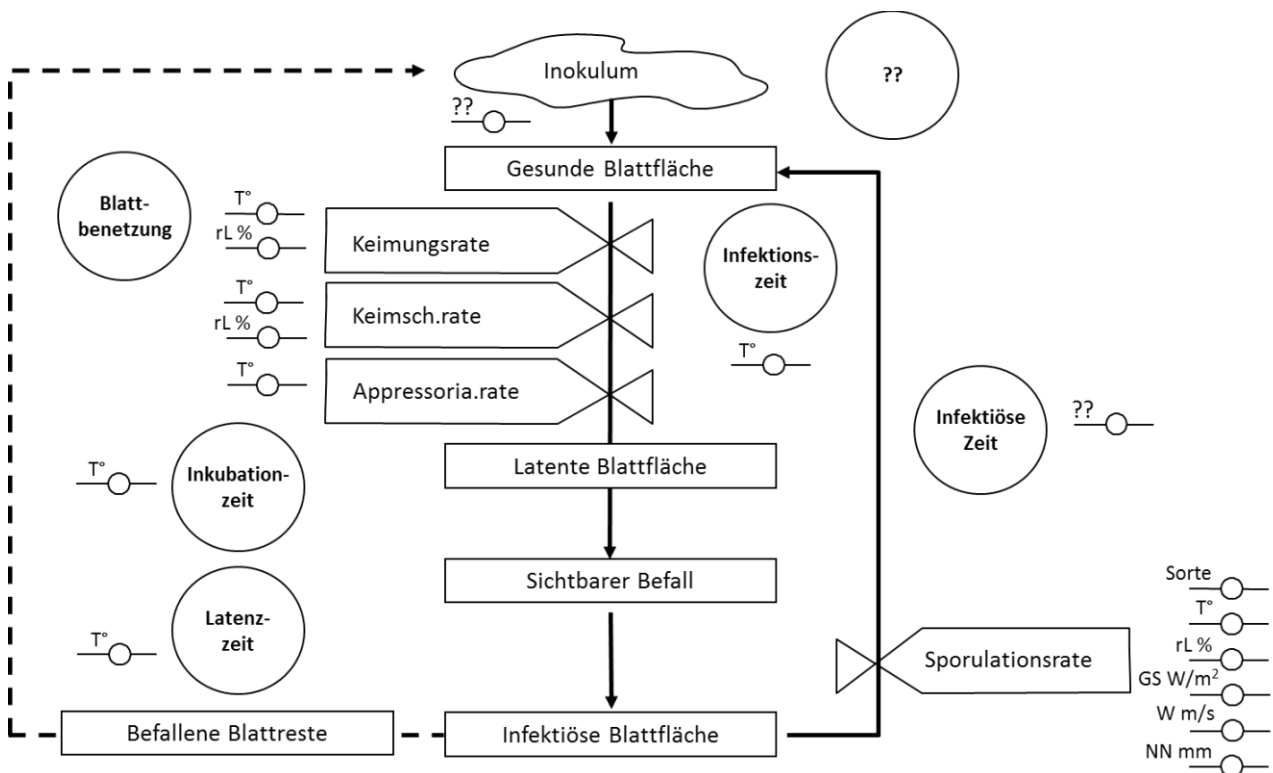


Abb. 18: Strukturdiagramm mit Zustandsvariablen, Flüssen, Raten, Parametern und Hilfsvariablen für eine theoretische polyzyklische Pflanzenkrankheit



MORGEN IST GESTERN—Eine Reise in die Vergangenheit

Sternzeit: 3113,2 Auf dem Weg zur Raumbasis 9 wird das Raumschiff Enterprise NCC-1701 in das Gravitationsfeld eines erloschenen Sterns gezogen. Die einzige Möglichkeit sich zu retten, besteht darin, mit voller Maschinenkraft durchzustarten. Durch dieses Manöver kommt die Enterprise zwar aus dem Gravitationsfeld heraus, wird aber katapultartig in den Weltraum geschleudert und die Crew verliert die Kontrolle über das Schiff...

So beginnt Episode 13 der Klassik Serie Star Trek, in der das Raumschiff Enterprise zurück in das Jahr 1968 reist.

Zum Glück brauchen wir keinen erloschenen Stern für unsere Reise in die Vergangenheit. Es reicht eine Universitätsbibliothek oder eine Internetverbindung. Viele Schaderreger sind bereits gut untersucht und in der Literatur beschrieben. Anschließend gilt es die Zusammenhänge zwischen

dem Krankheitserreger und den Umweltparametern zu erkennen, die die verschiedenen Stadien der Krankheitsentwicklung antreiben.

Beispielsweise hängt die Infektionswahrscheinlichkeit (IW) für eine Pilzkrankheit im Wesentlichen von zwei Parametern ab: der Temperatur (T) und der Blattnässe (LW). Für beide Parameter müssen wir die begrenzenden Werte wie Mindesttemperatur (T_{\min}) oder Mindestblattnässedauer (LW_{\min}) identifizieren, ab denen der Infektionsprozess ablaufen kann. Darüber hinaus gibt es maximale Grenzwerte (T_{\max} , LW_{\max}). Außerhalb dieser Werte kann keine Infektion stattfinden. Ähnliches gilt für die besonders temperaturabhängigen Insekten. Folglich empfiehlt sich eine intensive Überprüfung der verfügbaren Literaturangaben. Treten dabei relevante Informationslücken auf, müssen diese zunächst durch neue Experimente oder eine erweiterte Literaturrecherche geschlossen werden.

„Die Quadratwurzel des Mülls ist gleich Müll“

Paolo Racca

Nur biologisch bzw. epidemiologisch plausible Daten sind geeignet, um einen funktionierenden

Algorithmus formulieren zu können. Deshalb ist die Datenqualität von entscheidender Bedeutung.

„Meine Aufgabe ist es, Punkte mit Linien zu verbinden“

Paolo Racca

Wir müssen nicht den Aladin-Dschinn um Hilfe bitten, denn zum Glück entwickelten einige „Mathemagier“, genannt Epidemiologen, spezifische Funktionen, um aus den Daten Parameter abzuleiten.

Zum Beispiel kann die IW in Abhängigkeit von Temperatur und Blattnässedauer mit Hilfe von zwei mathematischen Funktionen abgebildet werden. Diese sind:

- Eine Glockenkurve für die Temperatur (z. B. die „einfache Beta-Funktion“)
- Eine S-förmige Funktion für die Blattnässedauer (z. B. die „Richard-Chapman-Funktion“)

Die IW in Abhängigkeit von der Temperatur = Beta Funktion wird folgendermaßen berechnet:

$$[1] \quad IW_T = k * (T - T_{\min})^n * (T_{\max} - T)^m$$

Wobei T_{\min} und T_{\max} Kardinaltemperaturen sind, welche die biologische Entwicklung begrenzen und k ist ein Formparameter.

Die beiden Exponenten n und m sind Formparameter und steuern die Schiefe der Funktion. Normalerweise ist n größer als m , so dass die optimale Temperatur näher an T_{\max} als an T_{\min} liegt.

Das Optimum der Temperatur T_{opt} von [1] wird berechnet mit:

$$[2] \quad T_{\text{opt}} = \frac{(n \cdot T_{\max} + m \cdot T_{\min})}{(n + m)}$$

Beispiel zur Berechnung der Keimungsrate beim Roggen-Braunrost (*Puccinia recondita*):

Im Rahmen von Klimakammerversuchen wurden Daten zur Sporenkeimung des Roggen-Braunrosts generiert und mithilfe der allgemeinen Beta-Funktion angepasst (Abb. 19).

In dem Beispiel wird die minimale Temperatur für die Keimung auf $3,73^{\circ}\text{C}$ geschätzt, das Maximum auf $29,9^{\circ}\text{C}$ und das Optimum, berechnet mit [2], auf 16°C . Das R^2 beträgt ca. 92% und alle berechneten Parameter sind statistisch signifikant ($P < 0,001$).

Die Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Blattnäsedauer lässt sich ebenfalls berechnen.

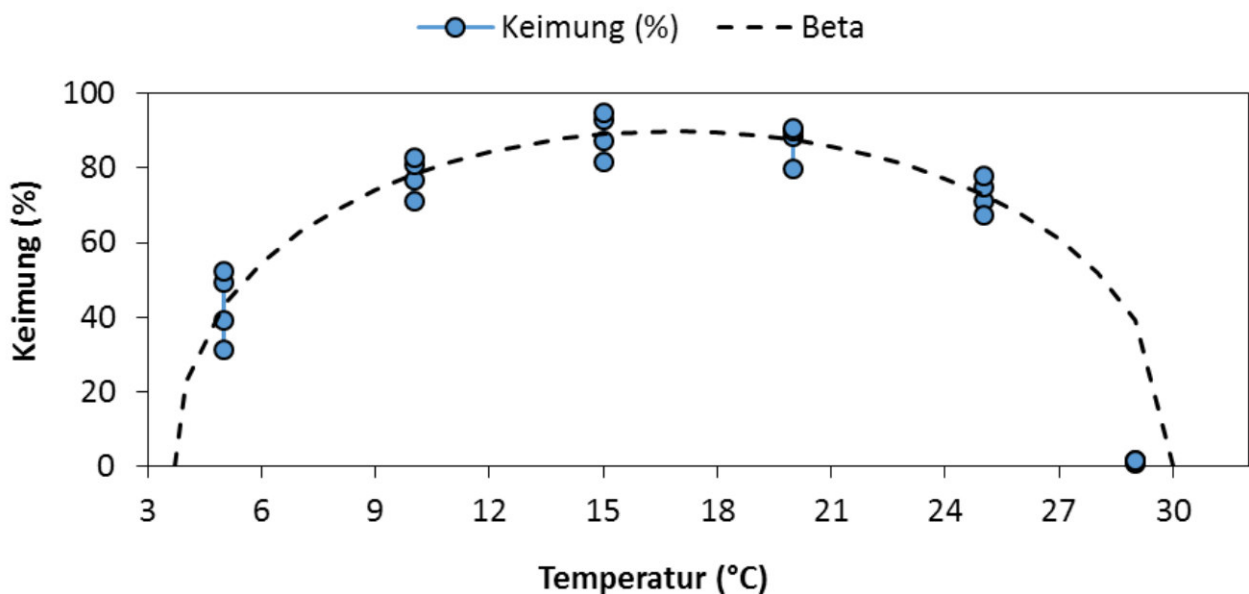


Abb. 19: Modellierte Keimung des Roggen-Braunrost (*Puccinia recondita*) in Abhängigkeit von der Temperatur mit allgemeiner Beta-Funktions-Anpassung

Neben der Temperatur beeinflusst meist auch die Blattnässe die Prozesse der pilzlichen Entwicklung, sodass sich lange Nässeperioden positiv auswirken. Daher wächst die IW-Funktion mit Blattnässedauer und kann beispielsweise durch eine Richard-Chapman-Funktion wie folgt beschrieben werden:

$$[3] \quad IW_{LW} = c * (1 - e^{-a* LW})^b$$

Wobei $IWLW$ die Infektionsrate in Abhängigkeit von der Blattnässedauer darstellt, LW für die Blattnässedauer steht und a , b und c die Formparameter sind.

In selbigem Experiment wurde die Sporenkeimung für unterschiedliche Temperaturregimes bei un-

terschiedlichen Blattnässedauern beobachtet. Insbesondere die Daten zur maximalen Benetzungsdauer von 16 Stunden bei 25°C wurden mit einer Richard-Chapman-Funktion modelliert (Abb. 20).

In den meisten Fällen sind die Einflüsse von Temperatur und Blattnässedauer nicht unabhängig voneinander, sondern beide Faktoren wirken gemeinsam. Unter der Annahme, dass die Effekte beider Faktoren multiplikativ sind, ergibt sich der Gesamteffekt aus:

$$[4] \quad r_{T/LW} = r_T * r_{LW}$$

Die Keimung des Roggen-Braunrosts hängt von der gemeinsamen Einwirkung von Tem-

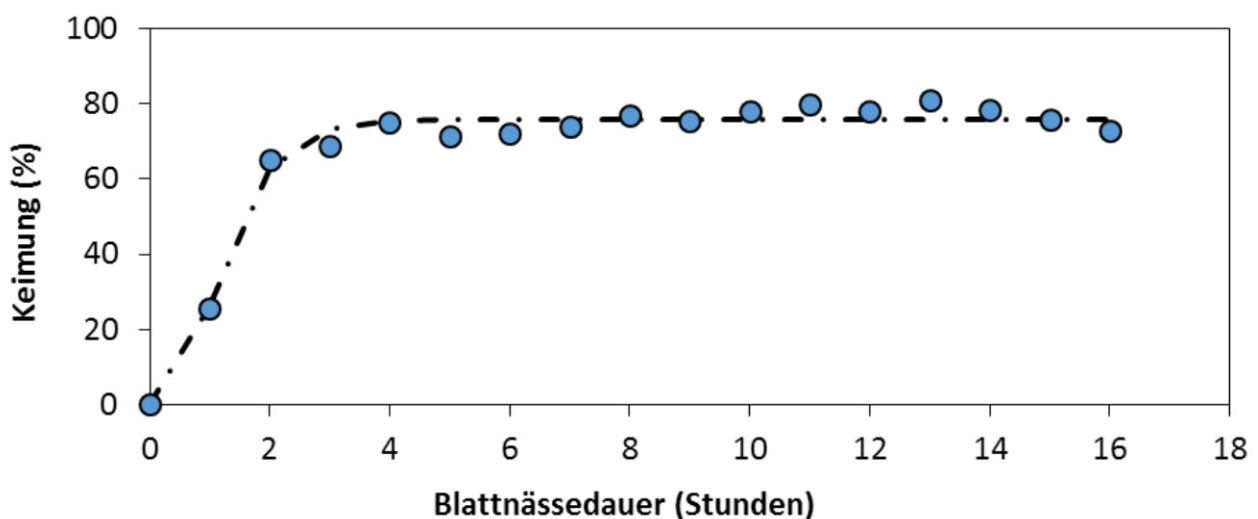


Abb. 20: Modellierte Keimung des Roggen-Braunrost (*Puccinia recondita*) (25°C) in Abhängigkeit von Blattnässedauer mit Richard-Chapmann Funktions-Anpassung

peratur und Blattnässedauer ab. Das Produkt der Effekte beider Faktoren wurde so normiert, dass der Maximalwert auf 1 festgelegt wurde (Abb. 21). Die Keimung (KE) in Bezug auf T und LW wurde beschrieben durch:

$$[5] \quad KE = d * (1 - e^{-a* LW})^b * (T - T_{min})^n * (T_{max} - T)^m$$

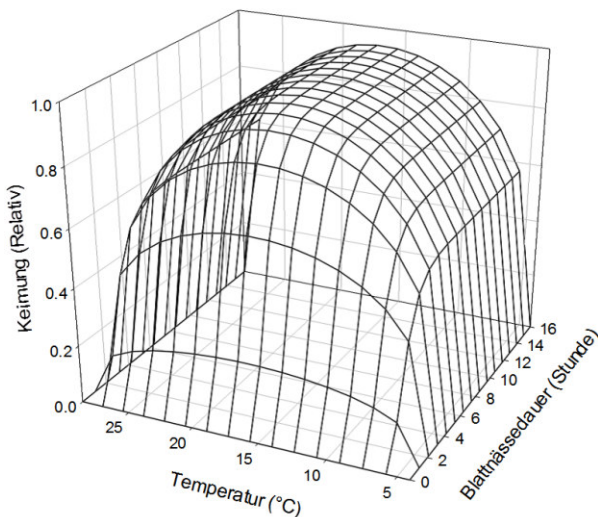


Abb. 21: Keimungsrate des Roggen-Braunrosts (*Puccinia recondita*) in Abhängigkeit von Temperatur (°C) und Blattnässedauer (in Stunden)

Wichtigster Parameter für die Entwicklung von Insekten ist die Temperatur. Auch in diesem Fall sind die Kardinalwerte besonders wichtig: T_{min} , T_{max} und T_{opt} . Besonders bekannt ist die so genannte „Briere“-Funktion, die explizit für die Berechnung der Entwicklungsrate von Insekten entwickelt wurde.

Die Formel lautet:

[6]

$$ER_{St} = p_1 \times T_i \times (T_i - T_{min}) \times (T_{max} - T_i)^{\frac{1}{m}}$$

Wobei ER_{St} der Entwicklungsgrad ist; T_i die aktuell gemessene, T_{min} die minimale und T_{max} die maximale Temperatur sind; p_1 und m stellen Formparameter dar.

T_{opt} lässt sich mit Funktion [7] berechnen.

Die Komponenten der Systemanalyse, insbesondere die Rate, können als "einzelnes" einfaches Modell verwendet oder in einen komplexeren Algorithmus einbezogen werden.

„Wenn es nass ist, ist es nass und wenn es trocken ist, ist es trocken“

Paolo Racca

Eine kleine philosophische Diskussion über die Blattnässe:

Blattnässe ist wahrscheinlich der wichtigste Parameter für eine Pilzinfektion, aber auch der am meisten diskutierte und umstrittenste.

Nach mehr als 20 Jahren Erfahrung in der Epidemiologie können

$$[7] \quad T_{opt} = \frac{2mT_{max} + (m+1)T_{min} + \sqrt{4m^2T_{max}^2 + (m+1)^2T_{min}^2 - 4m^2T_{min}T_{max}}}{4m+2}$$

wir mindestens ein Buch über die Blattnässe schreiben und welche Sensoren sie am besten messen. Das Problem ist, dass es den besten Sensor nicht gibt, da jeder seine spezifische Charakteristik hat! Die zuverlässigste Lösung ist die Verwendung eines berechneten Werts basierend auf den von der Wetterstation gemessenen Parametern wie Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Niederschlag, da sie auf physikalischen Größen beruhen. Der große Vorteil der Verwendung einer berechneten Blattnässe besteht darin, dass das daraus resultierende Modell an jedem Ort ohne Vorhandensein eines Blattnässe-sensors funktionsfähig ist.

Eine gebräuchliche Methode ist die Verwendung des Dampfdruckdefizits (engl.: = VPD – Vapour-pressure deficit). Sie gibt die Differenz (Defizit) zwischen der Feuchtigkeitsmenge in der Luft und der maximalen Feuchtigkeit an, die die Luft aufnehmen kann. Sobald die Luft gesättigt ist, kondensiert Wasser und es bilden sich Wolken, Tau oder Wasserfilme auf den Blättern.

Unter normalen atmosphärischen Bedingungen beginnt die Kondensation und folglich das Vorhandensein von freiem Wasser auf den Blättern bei einem VPD-Wert von etwa 0,02 psi.

MUHAMMAD IBN MUSA AL-CHWARIZMI

Wer war er?

Er war ein persisch-arabischer Mathematiker, der von 787 bis ca. 850 lebte. In seinem Lehrbuch findet man vor allem die Gesamtheit der Regeln zum formalen Lösen von Gleichungen. Diese Regeln (Handlungsvorschriften) bildeten lange Zeit die Grundlage für die Gleichungslehre und für Handlungsvorschriften wurde der Begriff „Algorithmus“ aus dem Namen des Autors abgeleitet.

In unserem Fall muss der Algorithmus eine Kette von Ereignissen oder Zustandsänderungen beschreiben, die später durch den Modelloutput repräsentiert werden. Bei Krankheiten kann der Algorithmus alle Prozesse vom Vorhandensein des Primärinokulums bis hin zur Produktion neuer

Sporen enthalten. Bei Insekten vom Austritt aus der Überwintungsphase bis zur nächsten Diapause.

Auch in diesem Fall muss nichts neu erfunden werden, da dafür bereits Algorithmen entwickelt wurden.

Bei Pflanzenkrankheiten ist der am weitesten verbreitete Algorithmus der der mechanistischen Modellierung (verknüpfte Differentialgleichungen).

Ein relativ einfaches, gekoppeltes Differentialgleichungsmodell für eine polyzyklische Krankheit ohne Pflanzensterblichkeit ist gegeben durch:

$$\begin{aligned}
 [8.1] \quad & \frac{dH}{dt} = -\beta HI \\
 [8.2] \quad & \frac{dL}{dt} = \beta HI - \omega L \\
 [8.3] \quad & \frac{dI}{dt} = \omega L - \mu I \\
 [8.4] \quad & \frac{dR}{dt} = \mu I
 \end{aligned}$$

Wobei H, L, I und R die Krankheitskomponenten geteilt durch die gesunde Blattfläche (H, healthy) darstellen Dabei ent-

spricht L der latenten Blattfläche (latent), I der sporulierenden oder infektiösen Blattfläche (infectious) und R der postinfektiösen Blattfläche (removal).

Der Parameter $1/\omega$ ist die mittlere Latenzzeit und $1/\mu$ ist die mittlere Infektionszeit.

β kennzeichnet hier die Infektionswahrscheinlichkeit.

Die Gesamterkrankung zu jedem Zeitpunkt wird als $Y=L+I+R$ bestimmt, der sichtbare Befall (Befallsstärke) als $Y_V=I+R$.

Ein einfacher Ansatz für Insekten besteht darin, verknüpfte Entwicklungsstadien mit logistischen Verteilungen wie folgt zu verwenden :

$$\begin{aligned}
 [9] \\
 [9.1] \quad & p_{St\ddot{u},rag} = 1 - \frac{1}{\left\{ 1 + e^{\left[-\frac{(St\ddot{u}-t_j)}{\sqrt{b\ddot{u}^2+t_j}} \right]} \right\}}
 \end{aligned}$$

$$[9.2] \quad p_{Sti,Tag} = \frac{1}{\left(1 + e^{\left[-\left(\frac{St_i - t_j}{\sqrt{bi^2 * t_j}} \right) \right]} \right)} - \frac{1}{\left(1 + e^{\left[-\left(\frac{St_{i-1} - t_j}{\sqrt{b(i-1)^2 * t_j}} \right) \right]} \right)}$$

$$[9.3] \quad p_{StD,Tag} = \frac{1}{\left(1 + e^{\left[-\left(\frac{St_D - t_j}{\sqrt{bD^2 * t_j}} \right) \right]} \right)}$$

Ein besonderes Beispiel:

Sternzeit 4523,1: „Quadrotriticale“ ist ein perennierendes Getreide. Es handelt sich um einen Hybriden aus Weizen und Roggen mit einem hohen Ertragswert und einer bläulichen Farbe. Es ist das einzige, zum Anbau auf dem Sherman-Planeten geeignete, irdische Getreide.

Das Raumschiff Enterprise reagiert auf einen Notruf der Raumstation K-7 in der Nähe der klingonischen Grenze, um dort eine Ladung Quadrotriticale zu schützen.

Es gäbe Probleme mit einer Krankheit und einem Schädling...

Die Krankheit „Puccinia quadrio-recondita“ hat den Sherman Planeten heimgesucht und der gesamte Ertrag könnte durch Infektionen dieses sehr aggressiven Pilzes deutlich reduziert werden (Mr. Spock vermutet, dieser Pilz wurde in Romulanischen Labors entwickelt und als „biologische“ Waffe genutzt).

Mr. Spock muss eine Lösung für beide Probleme finden. Mit Hilfe von Dr. McCoy (Pille) entdeckt er mittels Literaturrecherche ein altes Projekt zur Entwicklung eines DSS für Roggenbraunrost (*P. recondita*) Anfang des 21. Jahrhunderts. Dem Link folgend findet Mr. Spock eine sehr altmodische Internetseite einer ZEPP-Organisation, die immer noch lebt und jetzt „Zentralstelle der Vereinigten Föderation der Planeten für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz“ heißt und sich in den „United States of Germany“ auf dem „New Europe“ Planet befindet.

Und so entwickelt Mr. Spock mit Hilfe der Repräsentanten der ZEPP ein Modell für *P. quadrio-recondita*: PUCQREC.

Die Wetterbedingungen des Planeten sind sowohl für Krankhei-

ten als auch für die Pflanzenentwicklung sehr günstig. Mr. Spock berechnet eine feste IW von 0,4 pro Tag mit 5 Tagen Latenzzeit und 100 Tagen Infektionszeit. Das Ergebnis zeigt Abb. 22.

Da die Validierung sehr gute Ergebnisse zeigt, wurde das Modell in die Praxis eingeführt und ist bis jetzt auf www.isip.future.gov zu finden.

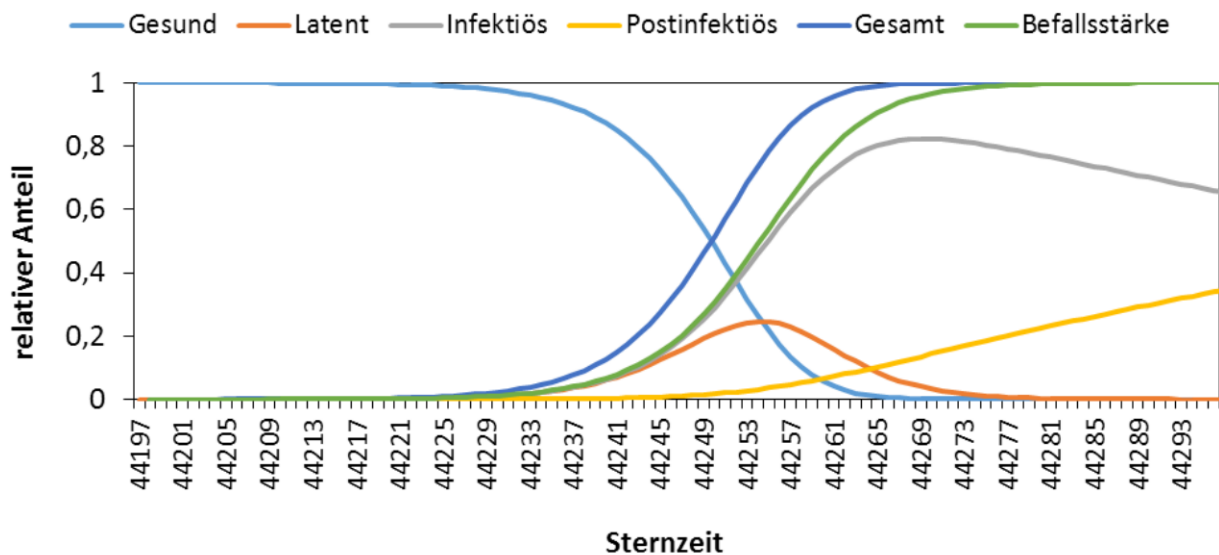


Abb. 22: PUCQTRI Ergebnisse. Simulationen der Modellkomponente der *P. quadrio-recondita* nach HLIR Schema. Sternzeit 44197.00. Wetterstation 2665

Das zweite zu lösende Problem ist der Tribble - ein sehr gefährliches Tier, das das gelagerte Getreide frisst und verunreinigt. Tribbles entwickeln sich sehr gut bei 20°C und stellen ihre Aktivität unterhalb von 10°C vollständig ein. Ihr Lebenszyklus umfasst vier Entwicklungsstadien plus ein Stadium, während dem die Tiere eine nicht sichtbare Diapause durchleben, in der sie anscheinend tief in das Lager zurückziehen. Dadurch sinkt der Füllstand des Getreidespeichers merklich, und steigt wieder kurz vor der neuen Ernte.

Die Biologie dieses Tieres muss noch untersucht werden. Mr. Spock verwendet den ZEPP-Ansatz mit logistischer Verteilung für ein Modell mit den folgenden Parametern:

$St_0=350$; $St_{1-3}=200$, und $St_4=350$ mit $b_0=5$, $b_{1-3}=10$ und $b_4=5$.

Das Ergebnis des neuen Modells SIMTRIB mit konstanter Temp. = 15°C ist in Abb. 23 dargestellt. Da die Temperatur im Getreidelager konstant bei 15°C liegt, ist auch die Entwicklung der Tribbles konstant. So schlussfolgert Mr. Spock,

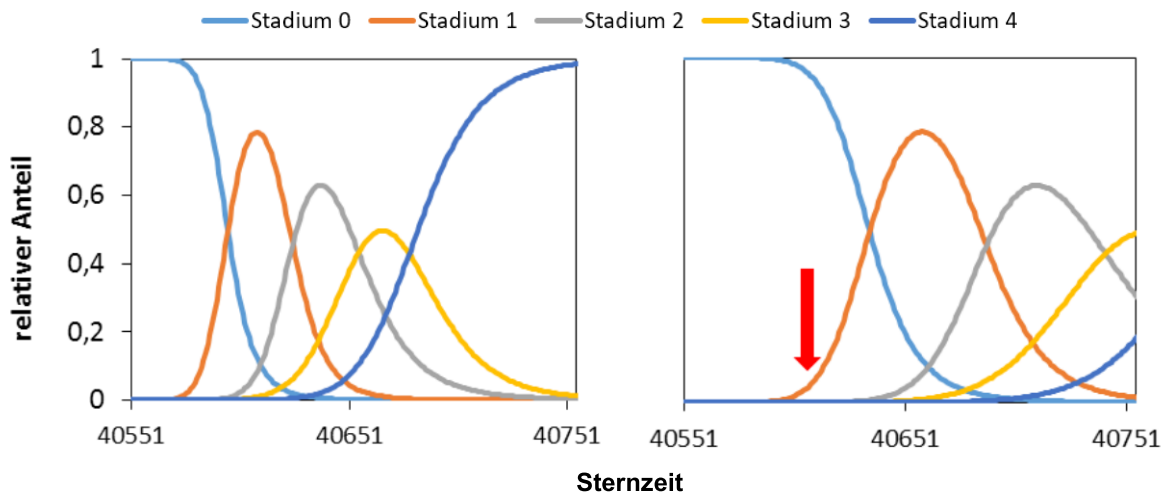


Abb. 23 & 24: Ergebnisse der Tribble Populationsdynamik (Proportion) Modell SIM-TRIB bei konstanter Lagertemperatur v. 15°C. Raumstation K-7, Lager 1 (links) und bei Lagertemperatur v. 12°C, roter Pfeil = Behandlungstermin (rechts)

dass es ausreicht, die Temperatur im Lager auf 12°C (die untere Schwelle für die Konservierung des Getreides) zu senken, um die tierische Entwicklung zu bremsen.

Um erhebliche Verluste zu vermeiden, kann eine zusätzliche Behandlung mittels CO₂-Sättigung des Lagers vorgenommen werden, wenn sich laut Modell 10% der Tiere im ersten Entwicklungsstadium befinden (Abb. 24). Der Schwellenwert wird immer noch von einem planetübergreifenden Team unabhängiger Pflanzenschützer validiert...

Ich entschuldige mich bei Gene Roddenberry, dem Erfinder und „Vater“ von Star Trek, wenn ich eine der lustigsten Folgen (Nummer 13) der 2. klassischen Serie etwas verändert habe. Allerdings ist es unvermeidlich, dass

wir bei der Suche nach fremden, neuen Welten und neuen Lebensformen auch mit deren Parasiten in Kontakt kommen, sodass es sich immer empfiehlt, einen Epidemiologen an Bord zu haben.

Ich entschuldige mich auch bei allen, die Mr. Spock von Enterprise und Star Trek nicht kennen oder noch nie davon gehört haben. Zu all diesen sage ich, dass sie nicht wissen, was sie verpasst haben, aber es gibt ja Netflix...



Dr. Paolo Racca

Weiterführende Literatur:

- Alexander D. (1997):** Gene Roddenberry. Der Schöpfer von Star Trek. Die autorisierte Biographie ISBN 13: 9783453127944
- Hau B. (1990):** Analytic models of plant disease in a changing environment. *Annual Review of Phytopathology*, 28. Jg., Nr. 1, S. 221-245.
- Hau B., Kranz J. (1990):** Mathematics and statistics for analyses in epidemiology. In: *Epidemics of plant diseases*. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 12-52.
- Kranz J. (Ed.). (2012):** *Epidemics of plant diseases: mathematical analysis and modeling (Vol. 13)*. Springer Science & Business Media.
- Madden L. V., Hughes G., van den Bosch F. (2007):** *The study of plant disease epidemics*. St. Paul, Minn., The American Phytopathological Society.
- Racca P., Kleinhenz B., Zeuner T., Keil B., Tschöpe B., & Jung J. (2011):** Decision Support Systems in Agriculture: Administration of Meteorological Data, Use of Geographic Information Systems(GIS) and Validation Methods in Crop Protection Warning Service. In: C. Jao (eds.), *Efficient decision support systems - Practice and challenges from current to future*, InTech. Rijeka, pp. 331-351.
- Racca P., Zeuner T., Jung J., Kleinhenz B. (2010):** Model Validation and Use of Geographic Information Systems in Crop Protection Warning Service. 10.1007/978-90-481-9277-9_16.
- Teng P. S. (1981):** Validation of computer models of plant disease epidemics: A review of philosophy and methodology. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 88, 49-63.
- Vanderplank J.E. (1963):** *Plant Disease: Epidemics and Control*. Academic Press, New York, 349 p