

Auswirkungen des Klimawandels auf Insekten

Autor

Beat Wermelinger

Dieser Beitrag gibt eine Darstellung von bereits beobachteten und künftig zu erwartenden Auswirkungen der sich verändernden Klimabedingungen auf die Biologie und Lebensweise von Insekten. Anhand von Beispielen aus der europäischen Forschung und mit einem Schwerpunkt auf in der Schweiz heimischen Waldinsekten werden die wichtigsten, typischerweise für Insekten in terrestrischen Ökosystemen geltenden Effekte dargestellt.

1. Relevante Klimafaktoren

Die ansteigenden Temperaturen sind der offensichtlichste Aspekt des Klimawandels. Der Temperaturdurchschnitt nahm in der Schweiz im 20. Jahrhundert kontinuierlich zu, mit einem deutlich stärkeren Anstieg ab 1980 (*Abb. 1A*). Die letzten 10 Jahre waren im Mittel 2.4 °C wärmer als der vorindustrielle Durchschnitt (METEOSCHWEIZ 2023). Die Anzahl Frosttage (mit Minimaltemperaturen unterhalb des Gefrierpunkts) und die Kälteperioden im Winter haben abgenommen, und die Nullgradgrenze in den Bergen ist angestiegen (BAFU 2020). Projektionen in die Zukunft ergeben eine Erhöhung der Sommertemperatur von 2.5–4.5 °C, je nach ergriffenen Klimaschutzmassnahmen (NCCS 2018).

Bei den Niederschlägen zeigt sich ein weniger klares Bild. Nur für die Winterniederschlagsmengen ergab sich bisher eine leichte signifikante Zunahme (BAFU 2020). In

Zukunft sind aber mehr niederschlagsarme Sommer zu erwarten (NCCS 2018). Da neben den zurückgehenden Sommerniederschlägen auch die Anzahl Hitzetage im Sommer klar zunimmt (*Abb. 1B*), erhöht sich auch die Verdunstungsrate des Bodens und der Vegetation (Evapotranspiration), und der Wassermangel für Mensch, Tier und Vegetation wird sich in dieser Jahreszeit verschärfen.

Auch andere Extremereignisse wie Starkniederschläge oder Stürme werden sich verändern. Während Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen zugenommen haben, ist das Muster bei den Stürmen weniger klar (CH2018 2018). Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit nahm zwar eher ab, aber es gab in der letzten Zeit immer wieder Perioden mit häufigem Auftreten von starken Stürmen (z. B. 1980–2000). Dies könnte auch in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts vermehrt der Fall sein (CH2018 2018).

2. Direkte Wirkung höherer Temperatur auf Insekten

Insekten sind poikilotherme Organismen, das heisst, ihre Körpertemperatur und ihr ganzer Metabolismus hängen im Wesentlichen von der Umgebungstemperatur ab. Die Temperatur ist damit der wichtigste abiotische Faktor, der die Entwicklung und Fortpflanzung von Insekten steuert. Innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs verändert sich die Entwicklungsgeschwindigkeit der meisten Insekten direkt proportional zur Temperatur (Abb. 2). Die untere Begrenzung der Entwicklung ist durch den sogenannten Entwicklungsnullpunkt gegeben. Diese Temperatur bezeichnet die Schwelle, oberhalb der eine Entwicklung der unreifen Stadien überhaupt stattfinden kann. Die obere Begrenzung des linearen Bereichs entspricht in etwa der maximalen

Entwicklungsgeschwindigkeit. Steigen die Temperaturen weiter an, wird die Funktion von Proteinen und Enzymen mehr und mehr gehemmt, bis die letale Temperaturschwelle erreicht ist und das Tier stirbt. Im linearen Bereich ermöglichen höhere Temperaturen den Insekten also grundsätzlich eine schnellere Entwicklung – was das Prädatationsrisiko mindert – und häufig auch eine höhere Nachkommenproduktion, was z. B. die Anzahl Generationen pro Jahr und die Populationsgrösse erhöhen kann (Abb. 3).

Höhere Temperaturen während der Vegetationsperiode begünstigen beispielsweise das massenhafte Auftreten gewisser blatt- oder nadelfressenden Raupen wie diejenigen des Schwammspinners (*Lymantria dispar*) oder der Prozessionsspinnerarten (*Thaumetopoea spp.*) (FEEMERS ET AL. 2003). Beim gut untersuchten Buchdrucker (*Ips typographus*), unseres bedeutendsten Borken-

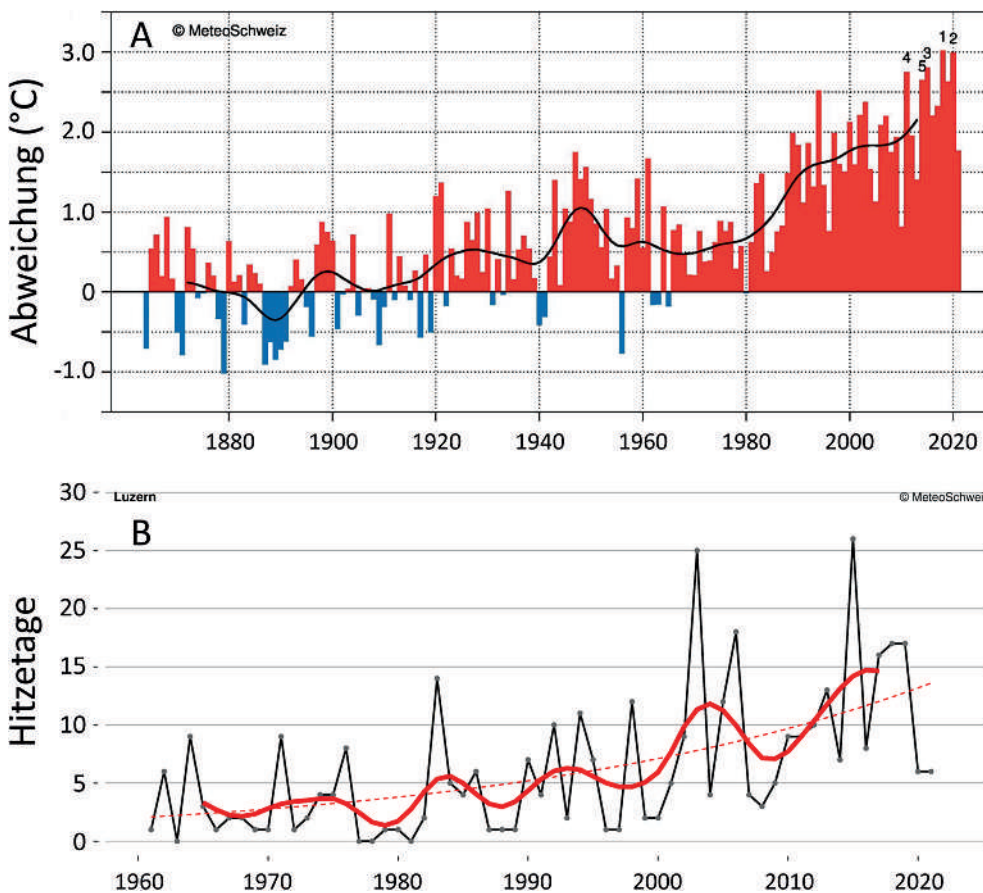


Abb. 1: A) Abweichung der durchschnittlichen Jahrestemperatur vom Durchschnitt 1871–1900 in der Schweiz; B) Anzahl Hitzetage ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$) in Luzern (METEOSCHWEIZ 2023).

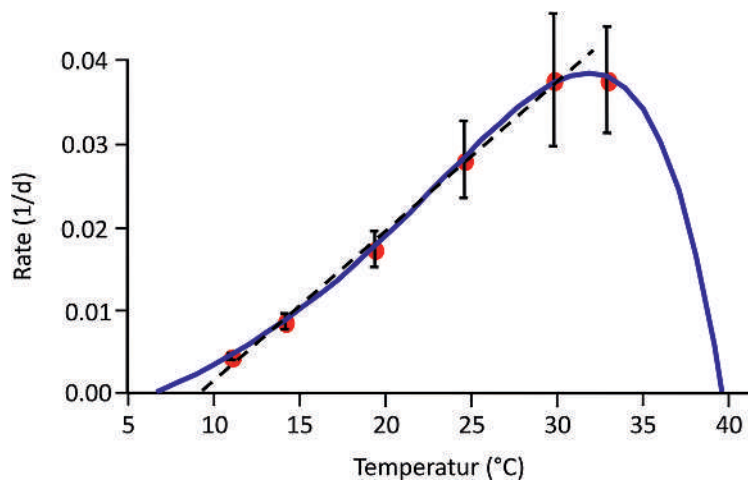


Abb. 2: Entwicklungsrate pro Tag von Eiern des Buchdruckers (*Ips typographus*) in Abhängigkeit von der Temperatur. Die gestrichelte Gerade zeigt den Bereich eines annähernd linearen Zusammenhangs zwischen Entwicklungsrate und Temperatur (nach WERMELINGER & SEIFERT 1998).



Abb. 3: Der wärmeliebende Hirschkäfer (*Lucanus cervus*) profitiert von den wärmeren Bedingungen und ist in den letzten Jahren wieder häufiger geworden. Er braucht für seine Larven aber auch geeignete Entwicklungssubstrate wie alte Eichen.

Foto: B. Wermelinger

käfers, liegt der lineare Bereich der Entwicklungsrate bei rund 10–30 °C (Abb. 2). Auch seine Reproduktionsrate steigt in diesem Bereich mit der Temperatur proportional an (WERMELINGER & SEIFERT 1999).

Basierend auf dieser Temperaturabhängigkeit wurde für diesen wirtschaftlich bedeutenden Käfer ein Phänologiemodell entwickelt, das die Simulation der Entwicklung, des Schwärmflugs und der Anzahl Generationen bei verschiedenen Klimaszenarien erlaubt (JAKOBY ET AL. 2019). Das Modell zeigt, dass im Schweizer Mittelland statt der bisher üblichen zwei Generationen pro Jahr gegen Ende dieses Jahrhunderts deren drei die Regel sein werden, was zu vermehrten Befällen führen dürfte. Die aktuelle Situation der Borkenkäferentwicklung kann unter www.borkenkaefer.ch für die gesamte Schweiz mit lokaler räumlicher Auflösung abgerufen werden. Dies gibt den Forstdienstlichen Informationen über den gegenwärtigen Entwicklungsstand der Buchdruckerpopulationen und das Risiko des Befalls von lebenden Bäumen.

Höhere Temperaturen während des Winters haben auf die Entwicklung der meisten Insekten eher geringen Einfluss, da die juvenilen Stadien sich oft – ausgelöst durch die Tageslänge oder tiefe Temperaturen – in einer Überwinterungsruhephase befinden, die erst im Frühling beendet wird. Wohl aber können sich milde Wintertemperaturen auf die Überlebensraten frostempfindlicher Tiere auswirken. Die auch bei uns eingeschleppte Marmorierete Baumwanze (*Halyomorpha halys*) zum Beispiel zeigte pro Grad Temperaturerhöhung eine Reduktion der Wintermortalität um 15% (KIRITANI 2006). Auch Blattläuse werden durch milde Wintertemperaturen begünstigt und erreichen in der folgenden Saison höhere Populationsdichten (EASTAUGH 2008; OHNESORGE 1961). Ein Beispiel mit direkter Auswirkung auf den Menschen sind die gefürchteten Zecken (*Ixodes ricinus*), die zu den Spinnentieren gehören. Diese sind bei milden Temperaturen auch im Winter aktiv und können so Krankheiten auf den Menschen übertragen.

Andererseits gibt es auch umgekehrte Beispiele. So überleben in den inneralpinen Tälern bei höheren Wintertemperaturen

weniger Eier des durch seine regelmässigen Zyklen berühmten, kälteadaptierten Lärchenwicklers (*Zeiraphera griseana*), da sich die Energiereserven der Eier durch den erhöhten Stoffwechsel erschöpfen (BALTENSWEILER 1993; WERMELINGER 2019). Höhere Temperaturen zeitig im Frühjahr bedeuten meistens auch frühere Aktivität der überwinterten Insektenstadien. Beim Aurorafalter (*Anthocharis cardamines*) verschiebt sich der Ausflug der Falter im Frühling pro Grad höhere Temperatur um 5 Tage nach vorn (SPARKS & YATES 1997).

3. Temperaturextreme

Viele Insekten haben also einen grossen Bereich an tolerierten Temperaturen und können sich als Individuum oder Population gut an etwas höhere Durchschnittstemperaturen anpassen. Grössere Auswirkungen haben jedoch abrupt auftretende Temperaturextreme (oder andere Witterungsextreme), auf die Insekten kaum mit evolutiver Anpassung reagieren können. Wenn Insekten im Frühling wärmebedingt früher aktiv werden und ihren Metabolismus bereits auf «Sommerbetrieb» umgestellt haben, können Spätfröste sehr hohe Mortalität zur Folge haben. Werden beispielsweise Wespenköniginnen in der heiklen Anfangsphase der Nestbegründung durch Frost abgetötet, bleibt die Wespeneiche das ganze Jahr tief, da weniger Kolonien entstehen, was im laufenden Jahr nicht mehr kompensiert werden kann. Generell können extreme Hitzewellen im Sommer zu einer Änderung der Aktivitätsmuster und erhöhter Sterblichkeit von Insekten führen.

Sehr anfällig auf Temperaturextreme sind die Wechselwirkungen innerhalb von Gemeinschaften von Insektenarten (z. B. Konkurrenz, Prädation) sowie zwischen Insekten und ihren Nahrungspflanzen, da nicht alle Ökosystempartner in gleicher Weise auf eine Temperaturveränderung reagieren (HARVEY ET AL. 2020; s. Abschnitt Wechselwirkungen). Hohe Temperaturen sind oft kombiniert mit Trockenheit, was den Ausfall der Nahrungsgrundlage bestimmter Insektenarten bedeuten kann. Witterungsextreme können so zu einem ab-

rupten Zusammenbruch oder einer Massenvermehrung bestimmter Arten führen (s. Abschnitt Sturm und Borkenkäfer).

4. Auswirkungen von Trockenheit

Trockenheit – oft gekoppelt mit hoher Temperatur – kann sich auf Insekten auf direkte und indirekte Art auswirken. Trockenheit kann direkte Nachteile für Entwicklung, Reproduktion und Verhalten von Insekten haben. Obwohl mit einer Wachsschicht versehen, reagieren die Entwicklungsstadien (Ei, Larve, Puppe) – insbesondere während der Häutungsphase – auf trockene Verhältnisse mit einer erhöhten Mortalität oder sogenannten Schlupfunfällen. Ebenso kann Trockenheit die Nahrungsaufnahme erschweren.

Von grösserer Bedeutung ist jedoch die indirekte Wirkung von Trockenheit, wenn sie die für Insekten relevante Nahrungsqualität von Pflanzen oder ihre Resistenz verändert. Bei leichtem Trockenstress reagieren Pflanzen mit einer höheren Konzentration von Aminosäuren und Kohlehydraten und erhöhen damit den osmotischen Druck. Dadurch sind sie in der Lage, das sinkende Wasserpotenzial im Boden zu kompensieren und genügend Wasser aufzunehmen. Für einige Insekten wie Blattläuse oder gewisse blattfressende Schmetterlingsraupen ermöglicht die erhöhte Konzentration von Nährstoffen und Energieträgern im Phloem oder Blattgewebe eine schnellere Entwicklung und erfolgreichere Fortpflanzung (KLOFT ET AL. 1985; Abb. 4). Dies kann der Auslöser von Massenvermehrungen solcher Arten sein.

Von Borkenkäfern ist bekannt, dass sie auf Trockenstress ihrer Wirtsbäume mit verheerenden Massenvermehrungen reagieren können (HLÁSNY ET AL. 2021). Die Fichte, die Hauptwirtsbaumart des Buchdruckers, kann bei Wassermangel nicht mehr genügend Harz zur Abwehr gegen das Eindringen dieser Borkenkäfer produzieren und wird deshalb für einen Befall attraktiver (NETHERER ET AL. 2015; WERMELINGER 2020). Die zu erwartenden höheren Temperaturen und vermehrte Trockenheit werden deshalb in Zukunft zu (noch) stärkeren Befällen von

Fichten durch Borkenkäfer führen (JAKOBY ET AL. 2016). Im Wallis liess sich zeigen, dass die Besiedlung von Waldföhren (*Pinus sylvestris*) durch Borkenkäfer, Prachtkäfer und Holzwespen stark mit dem Wasserdefizit der Vegetation zusammenhing (WERMELINGER ET AL. 2018; Abb. 5; WERMELINGER & THOMSON 2012).

5. Sturm und Borkenkäfer

Noch grössere Bedeutung als Trockenheit beim Auslösen von Borkenkäfer-Massenvermehrungen hatten bislang Stürme in fichtenreichen Wäldern. Die frisch geworfenen Fichten stellen ein ideales, resistenzarmes Substrat für die Besiedlung und Vermehrung von Borkenkäfern, speziell dem Buchdrucker, dar. So können die Käfer ihre Populationsdichten auf ein Niveau erhöhen, das ihnen erlaubt, auch abwehrkräftigere lebende Fichten zu besiedeln. Um diese Harzabwehr zu überwinden, braucht es eine gewisse Mindestanzahl von Käfern, die einen Baum gleichzeitig befallen und so seinen Harzvorrat erschöpfen. Auch vom Sturm geschwächte, aber noch stehen gebliebene Bäume sind attraktiv für einen Befall.

Dies lässt sich schön am Beispiel der sogenannten Käferholzmenge in der Schweiz zeigen (Abb. 6). Dies ist die Menge Fichten-

holz, die jährlich vom Buchdrucker befallen wird. Die befallenen Bäume sterben ab und werden von den Forstdiensten grösstenteils gefällt und abgeführt. Die erste Massenvermehrung in der dargestellten Erhebungsperiode ist das Resultat des Sturms Vivian im Februar 1990, die zweite Welle entwickelte sich nach dem Sturm Lothar vom Dezember 1999, deutlich akzentuiert durch den Hitzesommer 2003. Die letzte Massenvermehrung in der Schweiz ist der Trockenheit v. a. im Jahr 2018 geschuldet. Die Befälle gehen jeweils wieder zurück, wenn die Fichten einige Jahre nach dem Störungsereignis bei guter Wasserversorgung wieder vitaler werden, und durch die Regulation natürlicher Borkenkäferfeinde und die Bekämpfungsmassnahmen der Forstdienste (WERMELINGER 2020). Ökologische Störungen wie Sturm, Feuer und Borkenkäferbefall haben in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen (PATACCA ET AL. 2022).

6. Wechselwirkungen mit anderen Organismen

Wie schon bei den Auswirkungen von Trockenheit erwähnt, ist der Effekt von klimatischen Veränderungen auf das ökologische Beziehungsnetz zwischen Organismenarten genauso wichtig wie die direkte Wirkung auf



Abb. 4: Viele Blattläuse vermehren sich bei leichtem Trockenstress der Wirtspflanze besser, da der Pflanzensaft mehr osmotisch aktive Energieträger und Nährstoffe aufweist.

Foto: B. Wermelinger



Abb. 5: Der Blaue Kiefernprachtkäfer (*Phaenops cyanea*) kann schon unter nur leichtem Stress stehende Föhren entdecken und diese besiedeln.

Foto: B. Wermelinger

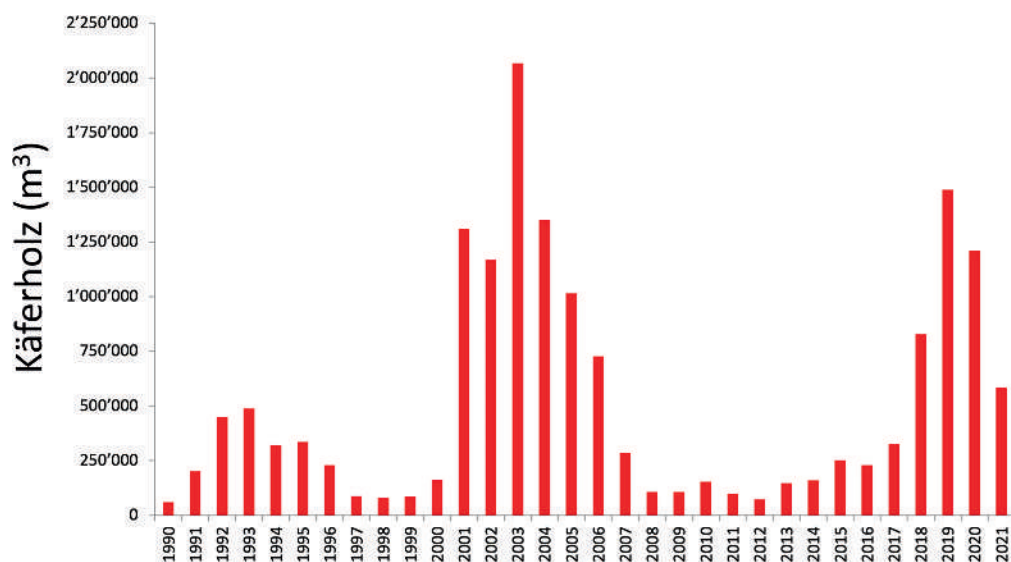


Abb. 6: Mengen des vom Buchdrucker (*Ips typographus*) befallenen Fichtenholzes in der Schweiz. Auslöser der Massenvermehrungen sind Stürme und Trockenheit (Daten von Waldschutz Schweiz, WSL).

Insekten. So kann sich ein klimatischer Faktor über die Verfügbarkeit der einen Art auf eine zweite Art auswirken. Niederschläge können zum Beispiel das Angebot bestimmter Pflanzen beeinflussen, was sich auf die darauf angewiesenen Insektenarten auswirkt. So werden gelegentlich auftretende Invasionen von Distelfaltern in Mitteleuropa auf hohe Niederschläge in den afrikanischen Überwinterungsgebieten zurückgeführt, die ein üppiges Wachstum der Nahrungspflanzen von Distelfalterraupen und damit hohe Populationen dieser Wanderfalter ermöglichen (HU ET AL. 2021).

Für viele im Eistadium überwinternde Schmetterlingsraupen ist der Austriebszeitpunkt ihrer Nahrungspflanzen entscheidend (sog. Koinzidenz). Schlüpfen die jungen Räumchen im Frühling, bevor die Knospen ihres Wirtsbaums ausgetrieben haben, verhungert ein Grossteil der Tiere. Schlüpfen sie zu spät, weisen die Blätter bereits höhere Konzentrationen von sekundären Pflanzenmetaboliten wie toxischen Phenolen, Gerbstoffen oder Harzen sowie tiefere Gehalte an lebenswichtigen Stickstoffverbindungen auf. Dies limitiert die Wachstums- und Überlebensraten der Raupen (HODKINSON & HUGHES 1982). Verschieben sich nun durch höhere Frühjahrstemperaturen die beiden

phänologischen Ereignisse des Austriebs und des Schlüpfens nicht synchron nach vorn, ergibt sich eine «Asynchronie». Die Populationen der betroffenen Schmetterlingsart werden reduziert, wenn sie nicht auf eine andere Baumart ausweichen können. Die Massenvermehrungen des Schwammspinners (*Lymantria dispar*) oder des Kleinen Frostspanners (*Operophtera brumata*) hängen typischerweise von einer guten Koinzidenz im Frühling ab (Abb. 7). Modellierungen mit Daten aus Holland zeigten, dass sich die Koinzidenz von Austrieb der Eichenblätter und Schlüpfen des Kleinen Frostspanners während 25 Jahren deutlich verschlechterte und die Räumchen bis zu 3 Wochen zu früh schlüpften (VISSER & HOLLEMAN 2001). Das resultierende kleinere Angebot an Raupen – Hauptnahrung für die Nestlinge z. B. von Kohlmeisen – hat auch einen deutlich geringeren Bruterfolg der von dieser Nahrung abhängenden Vögel zur Folge (PERRINS 1991).

Ein bekanntes Beispiel aus der Schweiz für solche Wechselwirkungen ist der schon oben erwähnte Lärchenwickler. Während drei Jahrzehnten um die Jahrhundertwende blieben die Populationsmaxima seiner regelmäßigen Zyklen im Engadin auf ungewöhnlich tiefem, unauffälligem Niveau, bis

Abb. 7: Die zeitliche Übereinstimmung (Koinzidenz) des Blattaustriebs und des Schlüpfens der Jungraupen des Kleinen Frostspanners (*Operophtera brumata*) entscheidet über die resultierende Populationsgrösse.

Foto: B. Wermelinger



die Lärchenwälder 2018 wieder einen sichtbaren Befall zeigten. Neben dem oben erwähnten, negativen Effekt höherer Wintertemperaturen auf die Eimortalität dürfte auch die schlechte Koinzidenz von Lärchenadelaustrieb und Raupenschlupf nach diesen warmen Wintern eine wichtige Rolle gespielt haben (WERMELINGER 2019). Höhere Wintertemperaturen können auch dazu führen, dass beispielsweise insektenpathogene Pilze die Mortalität von im Boden überwinternden Käfern, Schmetterlings- und Blattwespenraupen erhöhen (FEEMERS ET AL. 2003).

Parasitoide Insekten (z.B. «Schlupfwespen») legen ein oder mehrere Eier in oder an ein Wirtsinsekt, das von den schlüpfenden Larven anschliessend verzehrt wird. Grundsätzlich können auch Parasitoide von einer schnelleren Entwicklung bei höheren Temperaturen profitieren. Viele sind aber für die Parasitierung auf ein ganz bestimmtes Wirtsstadium (z.B. Ei, älteres Larvenstadium, Puppe) angewiesen. Wie bei der Koinzidenz beim Blattaustrieb kann sich auch hier bei höheren Temperaturen eine Asynchronie der Entwicklung des Wirts und des Parasitoiden ergeben. Wenn dann die adulten Schlupfwespen schlüpfen, finden sie für ihre Eiablage weniger Wirte im geeigneten Stadium. Dies wirkt sich negativ auf die Populationsgrösse des Parasitoiden und po-

sitiv auf diejenige des Wirts aus. Solche Zusammenhänge in Räuber-Beute-Beziehungen sind sehr schwierig abzuschätzen; generell wird jedoch von einem Auseinanderfallen («disruption») dieser Beziehungen ausgegangen (PARMESAN 2006).

7. Arealveränderungen

Höhere Temperaturen können dazu führen, dass kälteadaptierte Arten in kühlere Gebiete ausweichen müssen, oder dass umgekehrt ein zuvor klimatisch ungeeignetes Gebiet bestimmten Insektenarten neu ein erfolgreiches Überleben und Fortpflanzen ermöglicht. Dadurch ergeben sich Veränderungen in der Verbreitung der Arten. Dies kann eine Arealausdehnung nach Norden oder in höhere Lagen sein, oder eine Arealverschiebung, wenn Teile des ursprünglichen Areals ungeeignet, d.h. zu heiss für eine Art werden. Eine Arealveränderung kann nicht nur die Folge der direkten Temperaturwirkung auf die Entwicklung der Art sein, sondern – wie oben erwähnt – auch durch veränderte Wechselwirkungen mit anderen Organismen zustande kommen.

Solche Arealveränderungen wurden schon verschiedentlich dokumentiert. In Grossbritannien beispielsweise verschob sich das Vorkommen von Libellenarten in einem

Zeitraum von lediglich 40 Jahren (1960–2000) um bis zu 100 km nach Norden (HICKLING ET AL. 2006). In etwas geringerem Ausmass galt dies auch für Weich- und Laufkäfer, Wasserwanzen, Heuschrecken oder Tagfalter. Derselbe Trend wurde auch bei Wirbeltieren gefunden. In einer anderen Untersuchung, ebenfalls in England, zeigten im 20. Jh. 65 % der Tagfalterarten eine Verschiebung ihres Verbreitungsareals von 35–240 km nach Norden (PARMESAN ET AL. 1999). Die Veränderung der Artenzusammensetzung von Tagfaltern in Europa entspricht einer Verschiebung der Artengemeinschaften um 114 km nach Norden, dies in nur knapp 20 Jahren (DEVICTOR ET AL. 2012).

Der auch bei uns vorkommende Pinien-Prozessionsspinner (*Thaumetopoea pityocampa*) (Abb. 8), ein Nachtfalter, dessen Raupen durch ihre Brennhaare beim Menschen massive Reizungen der Haut und Atemwege verursachen können, hat seine Verbreitung in Frankreich in 30 Jahren um 87 km nach Norden und im italienischen Vinschgau um 200 m in die Höhe ausgedehnt (BATTISTI ET AL. 2005). In Spanien hat sich die untere Hö-

henverbreitungsgrenze von 16 Tagfalterarten in 30 Jahren um 212 m nach oben verschoben, mehr als die obere Grenze, sodass eine Arealverkleinerung resultierte (WILSON ET AL. 2005). Das erfolgreiche Ausweichen vor zu warmen Temperaturen in die Höhe setzt immer voraus, dass die übrigen Lebensbedingungen wie beispielsweise die Verfügbarkeit von Nahrungspflanzen im neuen Lebensraum gegeben sind, und dass das Habitat oben – wie auf einem Hügel oder Berg – nicht begrenzt ist.

Die Ausdehnung der nördlichen Verbreitungsgrenze hat auch dazu geführt, dass in letzter Zeit verschiedene Insektenarten aus dem Mittelmeerraum bei uns nördlich der Alpen aufgetaucht sind. Diese Arten können auf natürlichem Weg eingewandert oder durch menschliche Aktivitäten in neue Gebiete gelangt sein. Beispiele für aus dem Mittelmeerraum in die Schweiz eingewanderte Arten sind die Südliche Eichenschrecke (*Meconema meridionale*) oder die Malvenwanze (*Oxycarenus lavaterae*; Abb. 9). Die Eichenschrecke kommt heute im Tessin, in der Westschweiz, im Jura und fast in jedem Bal-



Abb. 8: Die Verbreitung des Pinienprozessionsspinners (*Thaumetopoea pityocampa*) hat als Folge der höheren Temperaturen nach Norden und in die Höhe zugenommen. In den gut sichtbaren Nestern an den Föhrenästen sind die Brennhaare der Raupen auch nach Jahren noch aktiv.
Foto: B. Wermelinger

lungsgebiet des Mittellandes (Wärme-Hotspots) vor, und die Malvenwanze schaffte es spätestens 2004 über die Alpen nach Basel und ist heute auch im Mittelland vorhanden (WERMELINGER ET AL. 2005). Auch die Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*), ursprünglich eine afrikanisch-mediterrane Art und in der Schweiz lange auf das Tessin und Wallis beschränkt, breitet sich nun nördlich der Alpen aus (RIMŠAITĖ ET AL. 2022). Weiter sind afrikanische Libellenarten jetzt sogar in Deutschland zu finden (OTT 2010).

Eine kürzlich erschienene Studie von Tagfaltern, Heuschrecken und Libellen zeigte, dass die Verbreitung der Arten in der Schweiz stark von den Klimaveränderungen der letzten 40 Jahre abhing (NEFF ET AL. 2022). Allerdings gab es sowohl Gewinner mit einer Zunahme der Verbreitung als auch Verlierer mit einer Abnahme. Der Klimateffekt wurde noch verstärkt durch Änderungen in der regionalen Landnutzung.

8. Eingeschleppte Arten (Neozoen)

Der Anstieg von Verschleppungen von Arten über Kontinente hinweg ist zwar keine Folge des Klimawandels, wohl aber des Globalen Wandels. Der in den letzten Jahrzehnten weltweit explodierende Warenhandel und die menschliche Reisetätigkeit haben auch in der Schweiz dazu geführt, dass immer mehr fremdländische Insektenarten eingeschleppt wurden (WERMELINGER 2014). Eine wichtige Voraussetzung für das Etablieren einer gebietsfremden Art ist neben geeigneten Nahrungsgrundlagen das Überstehen unserer Winter. Dazu haben die klimawandelbedingt milderen Winter seit Ende des letzten Jahrhunderts wesentlich beigetragen. So hat zum Beispiel in Davos die Anzahl Frosttage seit 1960 um 20% abgenommen (METEOSCHWEIZ 2023). Auch entsprechen vielfach die bei uns erhöhten Durchschnittstemperaturen den Bedingungen in den Herkunftsländern der Neozoen. Ein Beispiel für eine sich stark ausbreitende Art ist die bereits oben erwähnte, aus Ostasien eingeschleppte Marmorierete Baumwanze, die bei uns in landwirtschaftlichen Kulturen bereits Schäden verursacht (SAUER 2012).

9. Fazit

Insekten reagieren auf höhere Umgebungstemperaturen meistens mit einer schnelleren Entwicklung und höherer Reproduktion. Viele Arten können somit von erhöhten Temperaturen in einem gewissen Bereich profitieren. Andere folgen den Temperaturänderungen und erweitern ihr Verbreitungsareal. Eine durch Hitze und Trockenheit veränderte Pflanzenqualität begünstigt oft die Vermehrung von pflanzenfressenden Insekten.

Andere Wechselwirkungen von Insekten mit Pflanzen oder mit anderen Insektenarten können vom Klimawandel nachteilig beeinflusst werden. Verschiebt sich der Austrieb oder die Blüte einer Pflanze nicht synchron zur Insektenphänologie, bedeutet dies eine höhere Mortalität der von der Pflanze abhängigen Art. Dieselbe Asynchronie kann sich auch bei Räuber-Beute-Beziehungen ergeben.

Zu den Gewinnern des Klimawandels gehören Generalisten, die nicht nur von einer bestimmten Nahrungsquelle abhängen, mobile Arten, die andernorts neue Ressourcen erschliessen können, gewisse Schadorganismen wie Borkenkäfer, Läuse oder einige Schmetterlingsraupen, südliche, wärme-adaptierte Arten sowie Neozoen. Auf der Verliererseite stehen konkurrenzschwache, räumlich isolierte Spezialisten, immobile (häufig grosse) Arten, im Eistadium überwintende oder kühladaptierte Arten, die nicht nach Norden oder in die Höhe ausweichen können.

Der Klimawandel beeinflusst insbesondere die lange eingespielten Beziehungen im Nahrungsnetz der involvierten Organismen. Diese Effekte sind sehr schwierig abzuschätzen, dürften sich aber eher negativ auf die Stabilität der Beziehungen auswirken.



Abb. 9: Eine Kolonie von Malvenwanzen (*Oxycarenus laticollis*) an einer Linde. Diese Wanzenart hat sich vom mediterranen Gebiet nach Norden ausgebreitet und kommt jetzt auch im Schweizer Mittelland vor.

Foto: B. Wermelinger

Literatur

- BAFU (2020) Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Vol Nr. 2013, 2020
- BALTENSWEILER, W. (1993) Why the larch bud-moth cycle collapsed in the subalpine larch-cembra pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. *Oecologia* Vol 94, 1993, p 62–66
- BATTISTI, A., STASTNY, M., NETHERER, S., ROBINET, C. AND SCHOFF, A. (2005) Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Appl.* Vol 15, 2005, p 2084–2096
- CH2018 (2018) CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zürich
- DEVICTOR, V., VAN SWAAY, V., BRERETON, T., BROTONS, L., CHAMBERLAIN, D., HELIÖLÄ, J., HERRANDO, S., JULLIARD, R., KUUSSAARI, M., LINDSTRÖM, Å., REIF, J., ROY, D.B., SCHWEIGER, O., SETTELE, J., STEFANESCU, C., VAN STRIEN, A., VAN TURNHOUT, C., VERMOUZEK, Z., WALLISDEVRIES, M., WYNHOFF, I. AND JIGUET, F. (2012) Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Clim. Change* Vol 2, 2012, p 121–124
- EASTAUGH, C. (2008) Adaptions of forests to climate change: a multidisciplinary review. IUFRO, Occas. Papers 21, Vienna.
- FEEMERS, M., M, B., SKATULLA, U. AND GULDER, H. (2003) Klimaveränderungen und biotische Schäden im Wald. LWF-aktuell Vol 37, 2003, p 19–22
- HARVEY, J.A., HEINEN, R., GOLS, R. AND THAKUR, M.P. (2020) Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns. *Glob. Change Biol.*, 2020, 10.1111/gcb.15377
- HICKLING, R., ROY, D.B., HILL, J.K., FOX, R. AND THOMAS, C.D. (2006) The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob. Change Biol.* Vol 12, 2006, p 450–455
- HLÁSNÝ, T., ZIMOVÁ, S., MERGANIČOVÁ, K., ŠTĚPÁNEK, P., MODLINGER, R. AND TURČÁNI, M. (2021) Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *For. Ecol. Manage.* Vol 490, 2021, p 119075
- HODKINSON, I.D. AND HUGHES, M.K. (1982) Outline in ecological studies: Insect herbivory. London

- HU, G., STEFANESCU, C., OLIVER, T., ROY, D., BRERETON, T., VAN SWAAY, C., REYNOLDS, D. AND CHAPMAN, J. (2021) Environmental drivers of annual population fluctuations in a trans-Saharan insect migrant. *PNAS* Vol 118, 2021, e2102762118
- JAKOBY, O., STADELMANN, G., LISCHKE, H. AND WERMELINGER, B. (2016) Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. In: PLUESS, A.R., AUGUSTIN, S. AND BRANG, P. (EDS.): *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*, 2016, 247–264
- JAKOBY, O., LISCHKE, H. AND WERMELINGER, B. (2019) Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). *Glob. Change Biol.* Vol 25, 2019, p 4048–4063
- KIRITANI, K. (2006) Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan. *Popul. Ecol.* Vol 48, 2006, p 5–12
- KLOFT, W.J., MAURIZIO, A. AND KAESER, W. (1985) *Waldtracht und Waldhonig in der Imkerei*. München
- METEO SCHWEIZ – Online-Informationen zum Klimawandel. www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel (10.01.2023).
- NCCS (2018) CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National centre for climate services, Zürich.
- NEFF, F., KORNER-NIEVERGELT, F., REY, E., ALBRECHT, M., BOLLMANN, K., CAHENZLI, F., CHITTARO, Y., GOSSNER, M.M., MARTÍNEZ-NÚÑEZ, C., MEIER, E.S., MONNERAT, C., MORETTI, M., ROTH, T., HERZOG, F. AND KNOP, E. (2022) Different roles of concurring climate and regional land-use changes in past 40 years' insect trends. *Nature Commun.* Vol 13, 2022, 7611
- NETHERER, S., MATTHEWS, B., KATZENSTEINER, K., BLACKWELL, E., HENSCHKE, P., HIETZ, P., PENNERTORFER, J., ROSNER, S., KIKUTA, S. AND SCHUME, H. (2015) Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytol.* Vol 205, 2015, p 1128–1141
- OHNESORGE, B. (1961) Wann sind Schäden durch die Sitkalaus zu erwarten? *Allg Forst Z Waldwirtsch Umweltvorsorge* Vol 16, 1961, p 408–410
- OTT, J. (2010) Dragonflies and climatic change – recent trends in Germany and Europe. *Bio-Risk* Vol 5, 2010, p 253–286
- PARMESAN, C., RYRHOLM, N., STEFANESCU, C., HILL, J.K., THOMAS, C.D., DESCIMON, H., HUNTLEY, B., KAILA, L., KULLBERG, J., TAMMARU, T., TENNENT, W.J., THOMAS, J.A. AND WARREN, M. (1999) Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* Vol 399, 1999, p 579–583
- PARMESAN, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.* Vol 37, 2006, p 637–669
- PATACCA, M., LINDNER, M., LUCAS-BORJA, M.E., CORDONNIER, T., FIDEJ, G., GARDINER, B., HAUF, Y., JASINEVICIUS, G., LABONNE, S., LINKEVICIUS, E., MAHNKEN, M., MILANOVIC, S., NABUURS, G.J., NAGEL, T.A., NIKINMAA, L., PANYATOV, M., BERCAK, R., SEIDL, R., OSTROGOVIĆ SEVER, M.Z., SOCHA, J., THOM, D., VULETIC, D., ZUDIN, S. AND SCHELHAAS, M.J. (2023) Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Glob. Change Biol.* Vol 29, p 1359–1376
- PERRINGS, C.M. (1991) Tits and their caterpillar food supply. *Ibis* Vol 133 suppl. 1, 1991, p 49–54
- RIMŠAITĖ, J., IVINSKIS, P., BARTKEVIČIENĖ, G. AND BERNOTIENĖ, R. (2022) The northward spread of the European mantis, *Mantis religiosa* (Mantodea: Mantidae): Data from Lithuania. *Eur. J. Entomol.* Vol 119, 2022, p 318–326
- SAUER, C. (2012) Die Marmorierte Baumwanze tritt neu im Deutschschweizer Gemüsebau auf. *Gemüsebau Info* Vol 28/12, 2012, p 4–5
- SPARKS, T.H. AND YATES, T.J. (1997) The effect of spring temperature on the appearance dates of British butterflies 1883–1993. *Ecography* Vol 20, 1997, p 368–374
- VISSER, M.E. AND HOLLEMAN, L.J.M. (2001) Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proc. Royal Soc. London B* Vol 268, 2001, p 289–294
- WERMELINGER, B. AND SEIFERT, M. (1998) Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *J. Appl. Entomol.* Vol 122, 1998, p 185–191
- WERMELINGER, B. AND SEIFERT, M. (1999) Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecol. Entomol.* Vol 24, 1999, p 103–110

- WERMELINGER, B., WYNIER, D. AND FORSTER, B. (2005) Massenaufreten und erster Nachweis von *Oxycarenus lavaterae* (F.) (Heteroptera, Lygaeidae) auf der Schweizer Alpennordseite. Mitt. Schweiz. Entomol. Ges. Vol 78, 2005, p 311–316
- WERMELINGER, B. AND THOMSON, I.M. (2012) The woodwasp *Sirex noctilio* and its associated fungus *Amylostereum areolatum* in Europe. In: SLIPPERS, B., DE GROOT, P. AND WINGFIELD, M.J. (EDS.): The Sirex woodwasp and its fungal symbiont – Research and management of a worldwide invasive pest. Dordrecht, 2012, 65–80
- WERMELINGER, B. (2014) Invasive Gehölzinsekten: Bedrohung für den Schweizer Wald? Schweiz. Z. Forstwes. Vol 165, 2014, p 166–172
- WERMELINGER, B., GOSSNER, M.M., SCHNEIDER MATHIS, D., TRUMMER, D. AND RIGLING, A. (2018) Einfluss von Klima und Baumvitalität auf den Befall von Waldföhren durch rindenbrütende Insekten. Schweiz. Z. Forstwes. Vol 169, 2018, p 251–259
- WERMELINGER, B. (2019) Wiederauferstehung des Lärchenwicklers 2018. Bündner Wald Vol 72(6), 2019, p 30–35
- WERMELINGER, B. (2020) Der Borkenkäfer – Altes, Neues, Wissenswertes. Zürcher Wald Vol 1/20, 2020, p 22–26
- WILSON, J.W., GUTIÉRREZ, D., MARTINEZ, D., AGUDO, R. AND MONSERRAT, V.J. (2005) Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. Ecol. Lett. Vol 8, 2005, p 1138–1146

Beat Wermelinger



studierte an der ETH Zürich Biologie und schrieb dort auch seine Doktorarbeit über Insekten-Pflanzen-Beziehungen. Nach einem Postdoc in den USA war er zuerst wieder an der ETH als Oberassistent tätig, bevor er 1991 an die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL wechselte. Er leitete dort fast 30 Jahre die Forschungsgruppe «Waldentomologie» und lehrte an der ETH. Die wichtigsten Themen seiner praxisbezogenen Forschung zu Insekten waren die Borkenkäferproblematik, Störungsökologie, Waldnaturschutz und Biodiversität. Er ist seit 2022 offiziell im Ruhestand.

Kontakt: b.wer@hispeed.ch