

SONDERDRUCK

aus

4 | 2023

VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland



EPIGENETIK
Die Plastizität
von Ameisen

EXKURSION
Lebewesen unter
der UV-Lampe

**LEBENSMITTEL
TECHNOLOGIE**
Pflanzliche
Milchalternativen

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Leben
mit dem Feuer**





ABB. 1 Frische Brandfläche in Westaustralien am Tag nach einem Waldbrand. Durch das Feuer sind einige bereits durch ältere Waldbrände vorgeschädigte große Eukalyptusbäume umgekippt bzw. auseinandergebrochen. Auf der Brandfläche wurde der Australische Feuerkäfer (*Merimna atrata*) in großer Anzahl beobachtet und auf den Aschefeldern der Kleine Aschekäfer *Acanthocnemus nigricans* gefunden.

Leben auf einer frischen Brandfläche

Die Infrarotrezeptoren feuerliebender Insekten

HELMUT SCHMITZ | ANKE SCHMITZ

Eine kleine Gruppe von Insekten wird von Waldbränden angezogen. Sofort nachdem die Feuerwalze über ein Waldgebiet hinweggegangen ist, besiedeln diese Insekten, die als pyrophil bezeichnet werden, die frische Brandfläche (Abbildung 1) und beginnen mit der Fortpflanzung. Vertreter von drei Käfer- und einer Wanzenart haben als Spezialanpassung an die pyrophile Lebensweise Infrarotrezeptoren entwickelt. Diese sind jedoch bei den vier Gattungen ganz unterschiedlich gebaut und daher offensichtlich unabhängig voneinander entstanden. Zudem sind zwei verschiedene Funktionsprinzipien realisiert: ein sogenanntes photomechanisches und ein thermisches.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 340 erklärt.

Nach bisherigem Wissensstand verfügen alle Insekten über Thermorezeptoren auf ihren Fühlern, mit denen sie die Umgebungstemperatur messen können [1]. Die Thermorezeptoren, die als „Kältezellen“ oder als „Wärmeelemente“ die entsprechenden Temperaturänderungen registrieren können, sind dabei – häufig zusammen mit Rezeptoren für Feuchtigkeit – in sogenannten ▶ Sensillen angeordnet. Der von außen sichtbare, aus Kutikula bestehende Anteil eines solchen auf die Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit spezialisierten Sensillum besteht in der Regel nur aus einem wenige Mikrometer dicken und langen Zapfen. Die Thermorezeptoren können sehr empfindlich sein und dann auch zur Messung von Infrarot-(IR)-Strahlung dienen. So können nachtaktive blutsaugende Wanzen, die in Südamerika häufig die Chagas-Krankheit übertragen, mit ihren antennalen Thermorezeptoren bei Herumläufem auf ihren warmblütigen Wirten (inklusive des Menschen) gut durchblutete Hautbereiche detektieren und dann dort ihren Rüssel einstecken [2]. Diese infrarotsensorische Sinnesleistung funktioniert vermutlich nur auf kurze Entfernung (im Zentimeterbereich). Es könnte

zwar vermutet werden, dass die Wanzen ihre Infrarotsensoren ebenfalls nutzen, um ihre potenziellen Wirte aus größeren Entfernungen zu detektieren, doch dies ist bisher nicht belegt. Bei der „Fernortung“ spielen dagegen Geruchsstoffe und CO₂ eine wichtige Rolle. Hinzu kommt, dass der kleine Kutikulazapfen, der isoliert aus der Antennenoberfläche hinausragt, nicht als optimierter Absorber für IR-Strahlung bezeichnet werden kann.

Dagegen gibt es eine kleine Gruppe von Insekten, bestehend aus den Mitgliedern von drei Käfer- und einer Wanzenart, die zusätzlich zu den antennalen Thermorezeptoren über IR-Rezeptoren verfügen, die sich nicht auf den Antennen befinden. Das gemeinsame Merkmal dieser Gruppe ist das zunächst merkwürdig erscheinende Verhalten, dass alle Vertreter von Waldbränden angezogen werden und daher unmittelbar nach einem Waldbrand auf einer frischen Brandfläche gefunden werden können. Bevor im Einzelnen dargestellt wird, warum diese ► pyrophilen („feuerliebenden“) Insekten Waldbrände anfliegen, soll das Thema Waldbrand zunächst einer etwas erweiterten Betrachtung unterzogen werden, um die Evolution der Insekten-IR-Rezeptoren besser nachvollziehen zu können.

Waldbrände: verschiedene Aspekte einer Naturkatastrophe

Nicht erst seit die globale Klimaerwärmung in vielen Teilen der Welt für ein heißeres und trockeneres Klima sorgt, sind große Waldbrände für den Menschen bedrohlich. Insbesondere wenn Waldbrände außer Kontrolle geraten und nicht mehr gelöscht werden können, werden Gebäude und Infrastruktur zerstört, und es gibt Tote zu beklagen. In der EU verbrannten so im Jahre 2022 800.000 Hektar Wald (Quelle: www.euronews.com), wodurch ein Schaden von mehr als 2 Mrd. Euro entstand. Auf der anderen Seite gab es im Laufe der Evolution für viele Tiere und Pflanzen genug Zeit, sich an Feuer anzupassen und letztendlich sogar von Brandereignissen zu profitieren. Seit es Landpflanzen gibt, hat sich die Vegetation – zumeist ausgelöst durch Blitzschläge oder Vulkanismus – auch entzündet. Holzkohlereste wurden erstmalig im Silur vor 440 Mio. nachgewiesen. Große Mengen von Holzkohle wurden dann vor mehr als 300 Mio. Jahren in Ablagerungen des Karbons gefunden. In der „Steinkohlezeit“, wie das Karbon auch genannt wird, existierten die bekannten ausgedehnten Wälder aus Bärlapp-, Farn-, und Schachtelhalmbäumen, die nach ihrem Untergang maßgeblich für die Kohleentstehung verantwortlich waren. Als es im Perm dann vor 270 Mio. Jahren zunehmend trockener wurde, entstanden die ersten Nadelbäume und schließlich viel später in der Kreidezeit vor 100 Mio. Jahren auch die ersten Laubbäume.

Die Entwicklung von Bäumen war daher von Anfang an auch immer von Feuern begleitet. In periodisch von Feuern betroffenen Gebieten findet man daher häufig sogenannte Pyrophyten – also Pflanzen, die über Anpassun-

gen verfügen, um Feuer überleben zu können, oder die sogar von Waldbränden profitieren. Hierzu gehören bei Bäumen eine dicke und damit feuerresistente Rinde (viele Kiefern, Korkeichen im westlichen Mittelmeerraum, Riesenmammutbäume im Westen der USA). Laufen die Feuer als Bodenfeuer niedriger Intensität mit Temperaturen von ca. 400 bis 600 °C durch Krautschicht und Unterholz und erreichen die Kronen nicht, wird der Baum das Feuer unbeschadet überleben. Bei feuerangepassten Kiefern, Mammutbäumen aber auch bei australischen Banksia- und Eukalyptusarten öffnen sich vielfach die stark verholzten Samenstände und Nüsse überhaupt erst durch die Hitze einwirkung eines Feuers. So kann der freigesetzte Samen nach einem ersten Regen auf der nährstoffreichen Ascheschicht keimen. Ist das Feuer intensiver und greift in den Kronenbereich der Bäume, so verbrennen alle oberirdischen Teile eines im Vollfeuer stehenden Baumes oder Strauches und die Bast- und Rindenschicht wird durch die hohen Temperaturen von 1.000 °C und mehr abgetötet.

Feuerangepasste Bäume haben jedoch die Möglichkeit, aus unterirdischen Organen wieder auszuschlagen. Bekannte Beispiele dafür sind bei Eukalyptusarten und Banksien die Lignotuberknollen, die sich im basalen Stammbereich als Verdickungen größtenteils im Boden befinden. Hier sind Nährstoffe gespeichert und vor allem auch viele Proventivknospen („schlafende Knospen“) angesiedelt. Diese schlagen sehr schnell aus, wenn der oberirdische Teil zerstört worden ist. Solche Proventivknospen gibt es nicht nur bei feuerangepassten Bäumen auch im oberirdischen Stammbereich. Sollte also der Bast zumindest an einigen Stellen ein Feuer überstanden haben, so können aus diesen Knospen wieder Seitenäste entstehen, selbst wenn der Baum zunächst komplett verbrannt erscheint.

Die Entwicklung von geflügelten Insekten im Oberkarbon und die Entstehung von Käfern und Wanzen im Perm geht mit der geschilderten Entwicklung von Wäldern, in denen es immer schon Feuer gegeben hat, Hand in Hand. Nun muss jedoch der Blick auf die flugfähigen Insekten, um die es hier gehen soll, im Hinblick auf mögliche Feueranpassungen ein grundsätzlich anderer sein. Gerade die Flügel erlauben es einem Insekt ja, vor einem Feuer zu fliehen. Es ist davon auszugehen, dass alle geflügelten

IN KÜRZE

- Eine kleine Gruppe pyrophiler Insekten, zu der Vertreter von **drei Käfer- und einer Wanzenart** gehören, verfügt über Infrarot-(IR)-Rezeptoren.
- Innerhalb dieser Gruppe gibt es drei grundsätzlich **verschieden aufgebaute Typen von IR-Rezeptoren**, die nach zwei Funktionsprinzipien arbeiten.
- **Photomechanische IR-Rezeptoren** haben sich von Haar-Mechanorezeptoren aus entwickelt und basieren nach wie vor auf Mechanosensorik.
- **Thermische IR-Rezeptoren** messen eine durch IR-Absorption hervorgerufene Erwärmung einer für die IR-Absorption optimierten Absorberfläche des Rezeptors mit einem Thermosensor.



ABB. 2 Vertreter zweier Gattungen der pyrophilen Prachtkäfer: a) Der Schwarze Kiefernprachtkäfer *Melanophila acuminata*; Länge 1 cm. b) Der Australische Feuerkäfer *Merimna atrata* auf verbrannter Rinde eines Eukalyptusstammes; Länge 1,5 cm.

Insekten dies zunächst auch tun werden. Evolutionsbiologisch spannende Fragen sind nun, wann, von woher und warum die Insekten auf die Brandfläche zurückkehren. Nachdem die Feuerwalze über einen Waldbestand hinweggegangen ist, zeichnet sich die frische Brandfläche – im Folgenden auch als „aktive“ Brandfläche bezeichnet – in den ersten ein bis zwei Tagen durch viele lokale Brandherde aus, an denen umgestürzte Bäume oder heruntergefallene Äste noch brennen oder glühen. Rauchentwicklung und ein intensiver Brandgeruch zeichnet daher eine aktive Brandfläche aus (Abbildung 1). Auch gibt es eine Menge Aschefelder, die zum Teil noch Temperaturen von weit über 100 °C aufweisen. Bei Tageslicht kann man jedoch hier nichts mehr glühen sehen; eine Landung auf einer solchen Stelle wäre für ein Insekt fatal. Demzufolge ist eine aktive Brandfläche nicht nur für Insekten gefährlich, und Brandgeruch und Hitze werden dafür sorgen, dass dieses Areal gemieden wird.

Genau aus diesem Grund kann die aktive Brandfläche jedoch auch als interessante ökologische Nische gesehen werden: Es gibt weder Fressfeinde noch Konkurrenten! So kann unter dem Schutz von Qualm und Hitze das gesamte Fortpflanzungsverhalten von Partnerfindung bis zur Eiablage ungestört ablaufen. Die durch die hohen Temperaturen abgetöteten Bäume sind als Nahrungsquelle für holzfressende Insekten massenhaft vorhanden, da sie im Gegensatz zu gesunden Bäumen über keine Abwehrmechanismen gegen Insektenfraß mehr verfügen. Zusätz-

lich wachsen auf dem Brandholz in bodennahen Bereichen sehr bald pyrophile Pilze, die ebenfalls als Nahrungsquelle dienen können. Voraussetzung für das Auffinden und die Nutzung der aktiven Brandfläche ist natürlich das Vorhandensein spezieller Rauchgas- und Infrarot-(IR)-Sensoren.

Brandholznutzung durch pyrophile Prachtkäfer

Pyrophile Prachtkäfer der Gattungen *Melanophila* und *Merimna* werden von Waldbränden magisch angezogen und können daher nach einem Waldbrand sofort auf der aktiven Brandfläche gefunden werden [3, 4]. Die Gattung *Melanophila* enthält 11 Arten, die auf nahezu allen Kontinenten mit Ausnahme des australisch-ozeanischen Kontinents vorkommen. Die ► Wallace-Linie stellt daher die südöstliche Verbreitungsgrenze dieser Gattung dar. Jenseits dieser Linie beginnt das Verbreitungsgebiet der pyrophilen Gattung *Merimna*, die jedoch nur die Art *atrata* enthält, bekannt als *Australian Firebeetle*. *Merimna* ist auf dem gesamten australischen Kontinent verbreitet und wurde gelegentlich auch in Neu-Guinea gesichtet. Obwohl die Verbreitungsgebiete der beiden Gattungen sich nicht überlappen, weisen die *Melanophila*-Arten und die *Merimna*-Arten einige Gemeinsamkeiten auf. Zunächst machen die Vertreter beider Gattungen dem Namen ihrer Familie – Prachtkäfer – keine Ehre, da sie uniform tiefschwarz gefärbt sind (Abbildung 2). Dies ist als Anpassung an die Brandhabitats zu sehen: Sitzt ein Käfer ruhig auf einem verbrannten Baum, so ist er so gut wie unsichtbar. Auch das Verhalten auf den Brandflächen ist sehr ähnlich. Nach dem Eintreffen suchen beide Geschlechter nach Nahrung. Da die Käfer omnivor sind, kann diese aus allem bestehen, was durch das Feuer abgetötet bzw. geröstet wurde, aber noch genießbar ist – z. B. andere tote Insekten wie Ameisen aber auch Wirbeltiere. So wurde *Merimna* von den Autoren dabei beobachtet, wie zwei Käfer an einer toten Eidechse fraßen. In Gefangenschaft fressen beide Arten aber auch gerne Erdnüsse, Mandelsplitter und Rosinen. Während unbegattete Weibchen auf verbrannten Stämmen, aber auch auf dem Boden auf der Suche nach Nahrung herumlaufen und so für die Männchen sichtbar sind, zeigen die Männchen ein relativ stereotypes Suchverhalten nach Nahrung und Weibchen. Dies ist besonders bei *Merimna* in Australien gut zu beobachten [3]. Die Männchen fliegen verbrannte Eukalyptusstämme an und landen dort kopfaufwärts in Höhen zwischen 1–3 m. Dann drehen sie sich um 180 Grad und laufen stammabwärts; dabei suchen sie in Ritzen und Spalten der Rinde nach Nahrung und halten nach Artgenossen Ausschau – in der Hoffnung, ein unbegattetes Weibchen zu finden, mit dem dann sofort kopuliert wird. Kommt es nicht zur Kopulation, wird der Suchlauf in der Regel noch einige Meter auf dem Boden fortgesetzt, bis schließlich der nächste Stamm angefliegen wird.

Die begatteten Weibchen von *Melanophila* und *Merimna* legen schließlich die Eier unter der Rinde der verbrannten Bäume ab. Dazu wird der Eiablageapparat (Ovipositor) in Ritzen und Spalten in der äußeren Borke eingeführt. Wie die meisten Prachtkäferlarven fressen die Larven zunächst in der Bastschicht, bevor sie sich dann tiefer in das Holz einbohren und dort weiterfressen. Die Entwicklungszeit der *Melanophila*-Larven beträgt ein bis drei Jahre. Im Falle einer mehrjährigen Entwicklungszeit überwintern die Larven im Stamm. Bei *Merimna* ist die Dauer der Larvalentwicklung nicht genau bekannt.

Die Larven von *Melanophila* und *Merimna* nutzen beide das Holz verbrannter Bäume als Nahrungsquelle. Während *Melanophila*-Larven keine Wirtsspezifität zeigen und in über 100 verschiedenen Baumarten gefunden wurden, fressen *Merimna*-Larven ausschließlich in Eukalyptusarten. Selbst große Feuer in Banksia-Wäldern locken *Merimna* nicht an. Zu betonen ist noch, dass auch bei Bäumen, die in einem Vollfeuer standen und äußerlich völlig verbrannt erscheinen, die Bastschicht zwar durch die hohen Temperaturen abgetötet wurde, aber unverbrannt ist. Entfernt man die äußerlich verbrannte Rinde, wirkt der Bast und auch das darunter liegende Holz – außer einer durch die höhere Trockenheit bedingten geringfügigen Farbveränderung – fast völlig ungeschädigt. Die nun nicht mehr vorhandene Abwehrkraft des verbrannten Baumes ist der Hauptgrund, dass er als Nahrungsquelle für holzfressende Insektenlarven generell hochinteressant ist. So wird ein solcher Baum in den kommenden Wochen und Monaten nach einem Feuer auch von weiteren Pracht- und Bockkäfern mit Eiern belegt. Wer allerdings zuerst kommt, hat unbestreitbar viele Vorteile.

Obwohl die Brutbiologie und das pyrophile Verhalten von *Melanophila* und *Merimna* sehr ähnlich sind, verfügen die Gattungen doch über völlig unterschiedliche IR-Rezeptoren. Dies ist offensichtlich der Tatsache geschuldet, dass die Evolution der beiden Gattungen und damit auch die Entstehung der pyrophilen Lebensweise seit vielen Jahrtausenden getrennt voneinander verliefen und offensichtlich auch kein gemeinsamer pyrophiler Vorfahre existiert. Nach der Abspaltung Australiens von den Landmassen Gondwanas vor 60 Millionen Jahren verlief die Evolution der australischen Pflanzen- und Tierwelt unabhängig von der übrigen Kontinente. So entstanden auch die IR-Rezeptoren bei beiden Gattungen unabhängig voneinander. Diese werden in den folgenden Abschnitten weiter behandelt.

Von Aschefeldern angezogen: Der Kleine Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*)

In den lichten australischen Eukalyptuswäldern sind die Stämme am Boden häufig von dichten krautigen Pflanzen umgeben. Durch das Bodenfeuer wird diese niedrige Vegetation vollständig verbrannt und um die Stämme herum entstehen dadurch ausgedehnte und viele Zentimeter dicke Aschefelder. Hier findet man regelmäßig den nur 3–5 mm langen Kleinen Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*, Abbildung 3). Der unscheinbar dunkelbraun gefärbte Käfer ist die einzige Art in seiner Gattung, aber auch in der zugehörigen Familie Acanthocnemidae.

Ursprünglich endemisch in Australien wurde *Acanthocnemus* in den letzten Jahrzehnten auch in andere Teile der Erde verschleppt. So wurde diese Art bereits in Spanien und Russland nachgewiesen [5].

Sofort nach einem Feuer fliegen die Käfer in relativ geringer Höhe von ca. einem Meter auf die aktive Brandfläche und landen bevorzugt auf den bereits weitgehend wieder erkalteten Aschefeldern. Nach kurzem Verweilen beginnen sie dann einige Dutzend Sekunden lang äußerst hektisch herumzulaufen und tauchen schließlich in die Asche ab. Auch sieht man immer wieder Käfer aus der Asche herauskommen, die dann ebenfalls wieder kurz herumlaufen und anschließend entweder abfliegen oder wieder in der Asche verschwinden. Dies hat



ABB. 3 Der Kleine Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*); Länge 4 mm. Sobald der Käfer auf einer Ascheschicht herumläuft, bleiben in den zahlreichen Borsten auf seiner Oberfläche Aschepartikel hängen; so wird der Käfer nahezu unsichtbar.

zwei Konsequenzen: Zum einen fangen sich in den Borsten, die die gesamte Körperoberseite bedecken (Abbildung 3), viele feine Aschepartikel. Da der Käfer sich bei Störungen sofort totstellt, ist er damit in der Asche unsichtbar. Zum anderen hat es das Abtauchen in die Asche bisher verhindert, dass mehr über die Biologie von *Acanthocnemus* bekannt wurde. Zwar konnten die Autoren in einigen wenigen Fällen Kopulationen beobachten; was die Käfer jedoch in der Asche machen und wo die Weibchen schließlich die Eier ablegen, ist – genauso wie die gesamte Larvalentwicklung – weitgehend unbekannt. Hinweise darauf, dass das Eintauchen in die Asche ein Schutzmechanismus vor dem Gesehenwerden durch mögliche Fressfeinde ist, lieferten Beobachtungen im Freiland und Labor. Diese Versuche zeigten, dass über die Asche bzw. ein Versteck wehender Rauch bewirkt, dass sofort sehr viel mehr Käfer wieder auftauchen und herumlaufen, um eventuell auf Kopulationspartner zu treffen. Der Rauch könnte potenzielle Fressfeinde abschrecken und damit das Aschefeld für *Acanthocnemus* sicherer machen. Am Rande einer Brandfläche wurde beobachtet, wie eine kleine Eidechse sehr erfolgreich Jagd auf *Acanthocnemus*



ABB. 4 Die australische pyrophile Rindenwanze *Aradus fuscicornis*; Länge 4 mm. Die verwandte Art *A. albicornis* sieht sehr ähnlich aus.

machte; im Bereich des Aschefeldes war in dieser Situation keinerlei Rauch mehr wahrnehmbar.

Wie bereits ausgeführt, wäre eine Landung auf einem *bot spot* in einem ansonsten erkalteten Aschefeld tödlich. Daher verfügt *Acanthocnemus* ebenfalls über IR-Rezeptoren, die es dem Käfer ermöglichen, bereits im Anflug solche *bot spots* zu detektieren und bei zu großer Hitze noch nicht zu landen. Diese unterscheiden sich jedoch fundamental von denjenigen der beiden Prachtkäfergattungen und müssen daher wiederum unabhängig entstanden sein.

Nutzung von Pilzen durch pyrophile Rindenwanzen der Gattung *Aradus*

Innerhalb der großen Abteilung der Ascomyceten gibt es etliche Arten wie z. B. einige Vertreter der Gattung *Daldinia*, die als pyrophile Pilze nach einem Waldbrand

schnell beginnen, auf verbrannter Erde und Brandholz zu wachsen. Voraussetzung dafür ist ausreichende Feuchtigkeit. Indikatoren für günstige Verhältnisse für das Wachstum von Pilzen sind an Pilzen saugende pyrophile Rindenwanzen aus der Gattung *Aradus* [6]. So kann man in Australien auf frischen Brandflächen die pyrophilen Arten *A. albicornis* und *A. fuscicornis* (Abbildung 4) an dünnen Eukalyptusstämmchen finden, die an Ufern von Wasserläufen und Seen wachsen: z. B. an *Eucalyptus rudis*, dem *Western Australian Flooded Gum*.

Die Wanzen sitzen oft in Bodennähe an der Rinde und oftmals auch einige Zentimeter unterhalb der Erdoberfläche zwischen dem hier beginnenden Wurzelgeflecht. In diesem Bereich herrscht noch genügend Feuchtigkeit, und so können Pilze wachsen, an denen die Wanzen mit ihren auf das Aussaugen von Pilzhyphen spezialisierten langen Rüsseln saugen können. Die Wanzen kopulieren dort, die Weibchen legen Eier ab und sehr bald kann man dann auch verschieden weit entwickelte Jugendstadien sehen, die ebenfalls an den Pilzhyphen saugen und mit den zugeflogenen adulten Wanzen Sauggemeinschaften von einem Dutzend Tieren bilden können. Solange die Pilze wachsen, sind auch die Wanzen vor Ort. Trocknet schließlich der im Boden befindliche Teil des Stämmchens aus, so verschwinden auch die Wanzen.

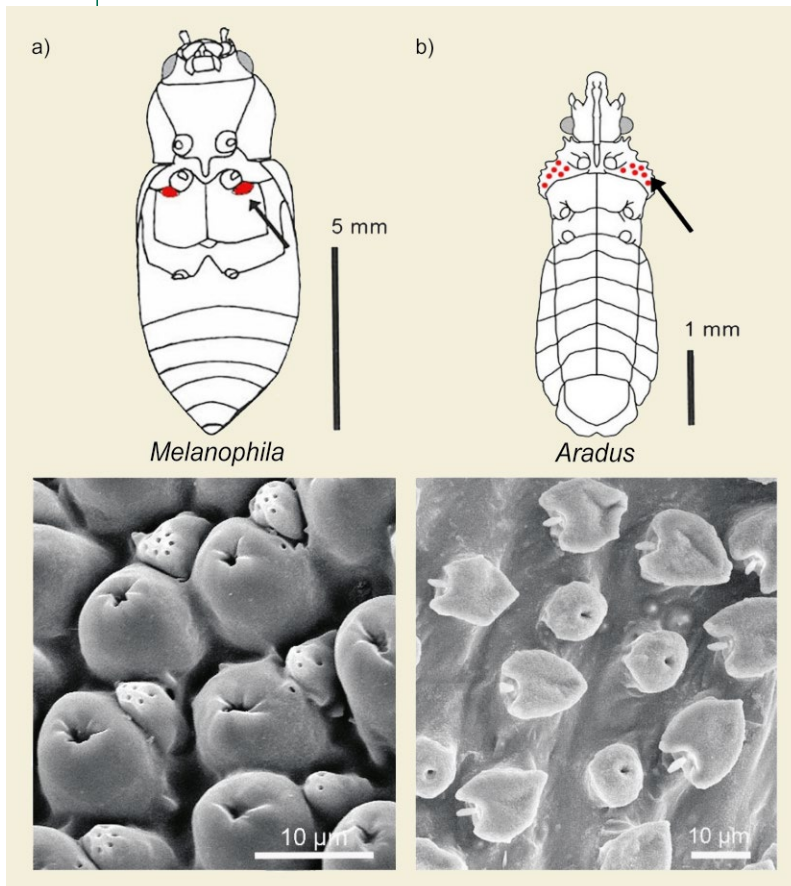
Bemerkenswert ist, dass die Gattung *Aradus* aus ca. 200 Arten besteht. Wie im folgenden Kapitel genauer ausgeführt wird, zeigen jedoch nur fünf *Aradus*-Arten ein pyrophiles Verhalten, und nur diese Arten besitzen auch IR-Rezeptoren. Interessanterweise ähneln diese stark den IR-Rezeptoren, wie sie bei *Melanophila*-Käfern vorkommen.

Die photomechanischen IR-Rezeptoren von *Melanophila*-Käfern und *Aradus*-Wanzen

Käfer und Wanzen haben sich seit ihrer Entstehung im Perm vor mehr als 250 Millionen Jahren von ausgestorbenen Vorläuferformen aus unabhängig voneinander entwickelt. Umso erstaunlicher erscheint es, dass sich die IR-Rezeptoren von Käfern der Gattung *Melanophila* und den pyrophilen *Aradus*-Arten im Hinblick auf Struktur und Funktion stark ähneln. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist, dass im Verlauf der Entwicklung einer pyrophilen Lebensweise nur bei den *Melanophila*-Prachtkäferarten und den wenigen pyrophilen *Aradus*-Arten IR-Rezeptoren jeweils neu entstanden sind. Als Folge dieser Entwicklungen findet man heute bei *Melanophila*-Käfern einige Dutzend IR-Sensillen dichtgedrängt am Grunde einer kleinen Grube, die sich direkt hinter den Hüften des 2. Beinpaars befinden [7] (Abbildung 5a). Bei den pyrophilen *Aradus*-Wanzen liegen die IR-Sensillen lose eingestreut zwischen normalen Haar-Mechanorezeptoren seitlich am Prothorax [8] (Abbildung 5b).

Von welchen Sensillen aus die Entwicklung der IR-Rezeptoren ihren Lauf genommen hat, kann jedoch mit großer Sicherheit gesagt werden [9]. Ausgangspunkt waren bei beiden Gattungen einfache Kontakt-Haar-Mechano-

ABB. 5 PHOTOMECHANISCHE IR-REZEPTOREN BEI *MELANOPHILA* UND *ARADUS*



Schematische Darstellung eines *Melanophila*-Käfers und einer pyrophilen *Aradus*-Wanze (Ansicht von ventral), Beine und Fühler nicht gezeigt. a) *Melanophila*: Die Lage des IR-Grubenorgans direkt hinter den Basen der Mittelbeine am 3. Thoraxsegment ist rot markiert. Unten: Rasterelektronenmikroskopische (REM)-Aufnahme einiger IR-Sensillen am Grunde der Grube. Die kleineren Vorwölbungen mit den Poren sind Ausführgänge von Wachsdrüsen. b) *Aradus*: Die Positionen einiger IR-Sensillen auf den seitlichen Oberflächen des 1. Thoraxsegmentes sind rot markiert. Unten: Einige IR-Sensillen zwischen normal ausgebildeten Mechanorezeptoren mit kurzen Borsten.

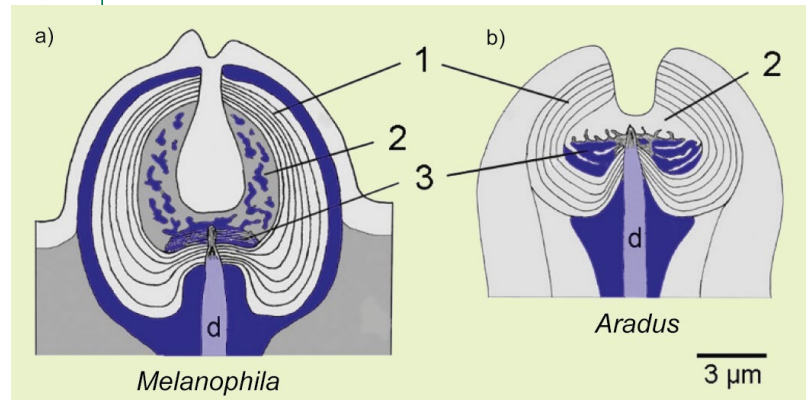
rezeptoren, die bei allen Insekten in großer Zahl auf der Körperoberfläche zu finden sind. Es handelt sich bei diesen Mechanorezeptoren um kurze Kutikulaborsten, die bei Abbiegung Nervenimpulse an das Zentralnervensystem übermitteln. Bei Insekten wird eine solche mechanosensitive Borste immer von nur einer Sinneszelle innerviert, die als typisches Strukturelement in der äußersten Spitze ihres reizaufnehmenden Dendriten einen ▶ Tubularkörper aufweist. Die Dendritenspitze mit dem Tubularkörper steckt in der Regel in der Basis der Kutikulaborste.

Etwas vereinfachend dargestellt, hat sich nun aus der Borste eine Kugel gebildet, die aufgrund ihrer größeren Oberfläche mehr IR-Strahlung absorbieren kann. Diese wird jedoch nach wie vor basal von einer einzelnen mechanosensitiven Sinneszelle innerviert, erkenntlich am in der Dendritenspitze gelegenen Tubularkörper (Abbildung 6). Da diese Sinneszelle im Experiment nach wie vor auch auf mechanische Reize antwortet, werden die IR-Rezeptoren als photomechanisch bezeichnet.

Wie funktioniert nun ein auf Mechanosensorik basierender IR-Rezeptor? Ein wichtiges Strukturelement ist zunächst die äußere Schale der Kugel, die aus harter Exokutikula besteht. Zur Erhöhung der Stabilität befinden sich in der Kutikula der Schale noch viele Lagen aus zugfesten Chitinfasern. Andererseits weist die Kugel in der Mitte ein sogenanntes „mikrofluidisches Zentrum“ auf, welches aus schwammartiger weicherer, unterhalb der Exokutikula angeordneter Mesokutikula besteht. In den Hohlräumen der Mesokutikula befindet sich eine wässrige Flüssigkeit nicht genauer bekannter Zusammensetzung. Hinzu kommt, dass Insektenkutikula – wie viele andere organische Materialien auch – IR-Strahlung im mittleren Infrarot (▶ MWIR) zwischen 3–8 μm sehr gut absorbiert. Auch Wasser absorbiert MWIR im Bereich von 3 μm sehr gut. Außerdem entspricht dieser Wellenlängenbereich ziemlich genau dem Emissionsmaximum von elektromagnetischer Strahlung, der von einem Waldbrand abgestrahlt wird. Durch die IR-Absorption kommt es zu einer Erwärmung und Ausdehnung der Kugel. Wenngleich der Wärmeausdehnungskoeffizient der äußeren Schale nicht bekannt ist, so ist doch davon auszugehen, dass die stabile Schale sich weniger stark ausdehnen wird als die im Inneren befindliche Flüssigkeit. Die Schale wirkt daher als äußere Druckkammer, die eine ungehinderte Ausdehnung der Flüssigkeit nicht zulässt. Als druckabbauende Struktur im mikrofluidischen Zentrum wirkt jedoch die Spitze des Dendriten der Sinneszelle. Diese wird durch den Druckanstieg leicht komprimiert, was einen adäquaten Reiz für einen Mechanorezeptor darstellt. Wie einen leichten Druck auf eine Fingerkuppe kann das Insekt daher die IR-Strahlung „fühlen“.

Bisher gibt es keine Verhaltensexperimente, die zeigen, aus welchen Entfernungen *Melanophila*-Käfer und *Aradus*-Wanzen Waldbrände detektierten und anfliegen können. Die nur wenige Millimeter großen Wanzen sind keine guten und ausdauernden Flieger und werden so

ABB. 6 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER PHOTOMECHANISCHEN IR-REZEPTOREN



Querschnitte durch photomechanische IR-Sensillen von a) *Melanophila* und b) einer pyrophilen Rindenwanze der Gattung *Aradus*. 1: äußere Schale der Kugel bestehend aus harter faserverstärkter Exokutikula, 2: im Zentrum der Kugel befindliche weichere Mesokutikula, im *Melanophila*-Sensillum von vielen kleinen Hohlräumen durchsetzt, 3: flüssigkeitsgefüllte „innere Druckkammer“, die die drucksensible Spitze des Dendriten (d) umgibt. In der distalen Spitze des Dendriten befindet sich der Tubularkörper.

eher von der näheren Umgebung aus eine frische Brandfläche besiedeln. Die IR-Rezeptoren schützen sie dann davor, auf einer heißen Stelle zu landen. Demgegenüber sind *Melanophila*-Käfer gute Flieger. In der entomologischen Literatur existiert ein bemerkenswerter Bericht, in dem geschildert wird, dass die nordamerikanische Art *Melanophila consputa* im Jahre 1924 in ungeheuren Massen einen über mehrere Tage brennenden Öltank im kalifornischen Coalinga angefliegen hat. Im Jahr 2012 erschien eine Simulationsstudie, in der zunächst alle heute noch verfügbaren Informationen über dieses Brandereignis und den Käferanflug zusammengetragen wurden [10]. Aufgrund dieser Daten kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass es möglich sein könnte, dass die Käfer dieses Feuer aus über 100 km Entfernung detektierten und dass die IR-Sensorik dabei eine Rolle gespielt hat. In diesem Fall wäre eine Sensitivität der IR-Sensillen von nur wenigen Nanowatt/cm² zu fordern. Dies entspräche der Sensitivität von modernen gekühlten Halbleiter-IR-Sensoren.

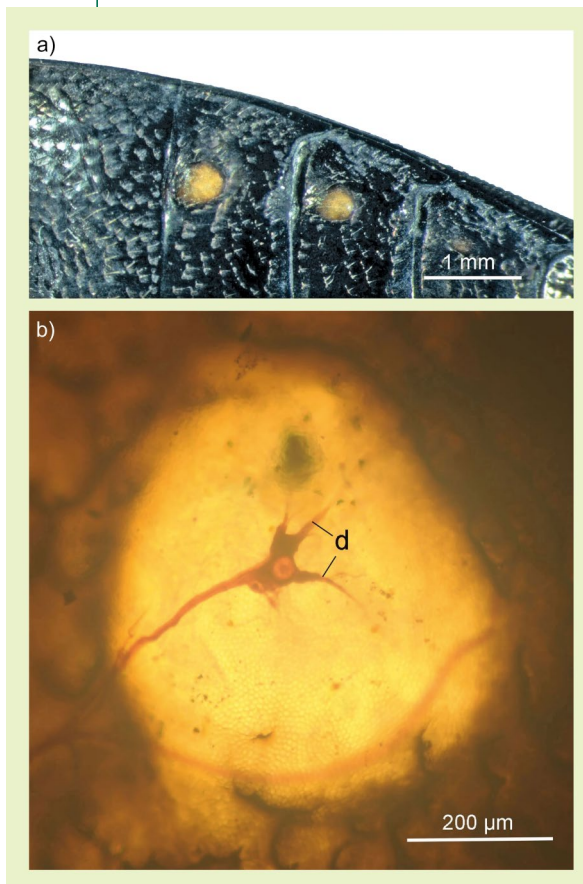
Die thermischen IR-Rezeptoren von *Merimna atrata* und *Acanthocnemus nigricans*

Über einen grundsätzlich anderen Typ von IR-Rezeptor verfügen die beiden anderen australischen pyrophilen Käfer *Merimna atrata* (Abbildung 2b) und *Acanthocnemus nigricans* (Abbildung 3). Hierbei handelt es sich um sogenannte thermische Sensoren, bei der die Erwärmung der IR-absorbierenden Rezeptoroberflächen von Thermorezeptoren gemessen wird. Die morphologischen Unterschiede zwischen den thermischen IR-Rezeptoren von *Merimna* und *Acanthocnemus* sind jedoch erheblich. Auch hier kann daher geschlussfolgert werden, dass sie bei beiden Arten unabhängig voneinander entstanden sein müssen.

Abdominale IR-Rezeptoren beim Australischen Feuerkäfer (*Merimna atrata*)

Bei *Merimna* findet man bei den meisten Käfern beider Geschlechter zwei Paare von IR-Rezeptoren am zweiten und dritten Abdominalsegment [11]. Von außen sieht man bei diesen Käfern seitlich an diesen Segmenten je einen der rundlichen Rezeptoren (Abbildung 7a). Dabei handelt es sich um die IR-absorbierenden Flächen der Rezeptoren, die wie kleine Satellitenschüsseln nach innen eingewölbt sind. Auch farblich fallen diese Bereiche auf: Sie sind hellgelb gefärbt und heben sich daher von der umgebenden tiefschwarzen Kutikula ab. Interpretiert werden kann das als Anpassung der Absorptionseigenschaften an eine bevorzugte Absorption von MWIR-Strahlung. Die hellgelbe, fast ungefärbte Kutikula absorbiert sichtbares Licht schlechter als eine durch Melanineinlagerungen schwarz gefärbte Kutikula. Im Infrarotbereich sieht dies anders

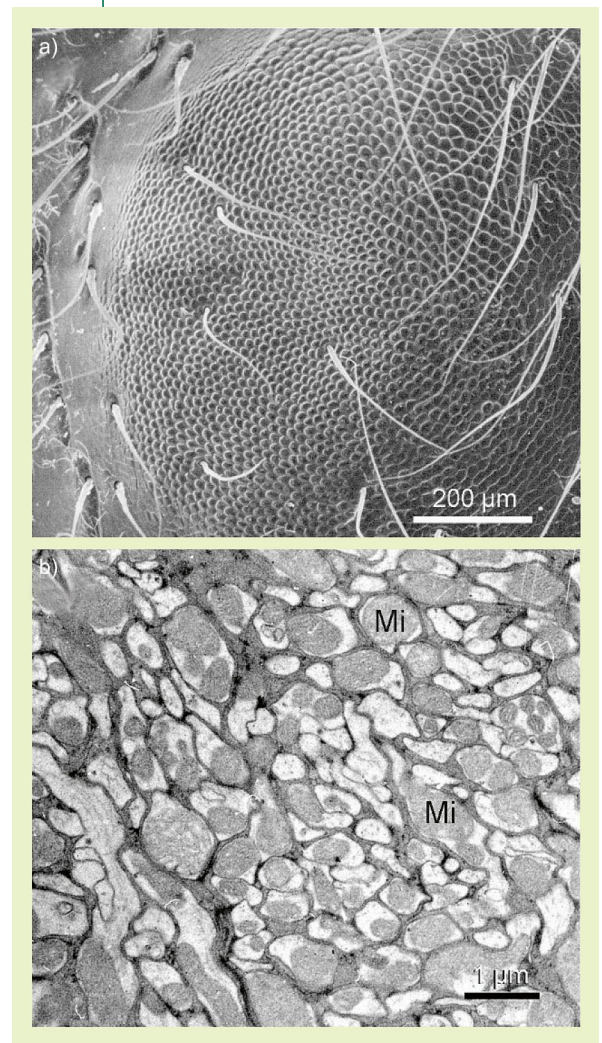
ABB. 7 | ABDOMINALE IR-REZEPTOREN BEI *MERIMNA*



a) Ventralansicht einer Abdomenhälfte von *Merimna* (Ausschnitt, Kopf links). Auf dem 2. und 3. Sternit sind die gelblichen absorbierenden Bereiche der IR-Organ sichtbar. **b)** Einzelnes IR-Organ. Unterhalb der transparenten Kutikula ist das mit einem schwarzen Farbstoff gefüllte multipolare Neuron zu sehen. Gut erkennbar sind die vom Zellkörper der Sinneszelle ausgehenden terminalen Dendritenbereiche (d).

aus, da Insektenkutikula wie gesagt gerade im MWIR sehr gut absorbiert. So kann bereits auf Rezeptorebene ein unerwünschter Temperaturanstieg durch Absorption von sichtbarem Licht minimiert werden. Auffällig ist weiterhin eine wabenartige Strukturierung der Oberfläche innerhalb der Absorberfläche (Abbildung 8a). Ob dies ebenfalls der Optimierung der IR-Absorption, der Erhöhung der Stabilität der hier relativ dünnen Kutikula oder beidem dient, kann gegenwärtig noch nicht gesagt werden. Im Körperinneren ist ungefähr in der Mitte der Absorberfläche direkt an der Unterseite der Kutikula der Thermosensor befestigt (Abbildung 7b). Es handelt sich immer um ein einzelnes

ABB. 8 | ELEKTRONENMIKROSKOPIE DER IR-REZEPTOREN VON *MERIMNA*



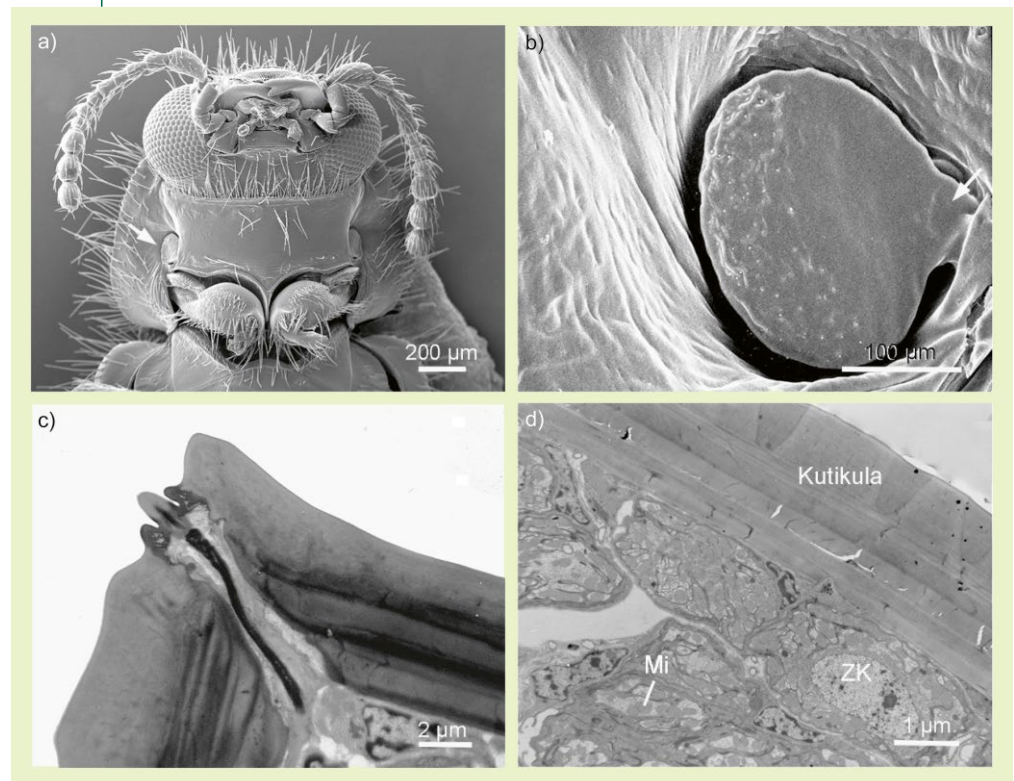
a) REM-Aufnahme einer IR-absorbierenden Fläche eines IR-Organs von *Merimna*. Gut sichtbar ist die wabenartige Mikrostrukturierung. **b)** Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme eines Querschnitts durch eine terminale Dendritenmasse. Zahlreiche dünne Dendritenendigungen liegen dicht zusammengepackt und enthalten große Mengen an Mitochondrien (graue Scheibchen, Mi).

sehr großes, sogenanntes multipolares Neuron [12] – multipolar deshalb, weil der reizaufnehmende dendritische Bereich sich in unzählige lange und sehr dünne terminale Einzeldendriten aufspaltet. Diese bleiben, ähnlich wie die Borsten eines Pinsels, dicht zusammen und zeichnen sich durch große Mengen an in ihrem Inneren gelegenen Mitochondrien aus (Abbildung 8b). Daher wurde die Dendritenregion als „Terminale Dendritenmasse“ (TDM) bezeichnet. Ob die Mitochondrien bei der IR-Absorption eine Rolle spielen, ist bisher unbekannt.

Bei konstanter Temperatur sendet das Neuron kontinuierlich Nervenimpulse an das Zentralnervensystem und kodiert so die momentan herrschende Umgebungstemperatur. Bei Zimmertemperatur liegen die „Feuerfrequenzen“ zwischen 10 und 20 Hz. Bei IR-Absorption steigen die Frequenzen in Abhängigkeit der Intensität sofort an und signalisieren so eine IR-Quelle, z. B. eine heiße Stelle auf dem Boden [13]. Verhaltensversuche haben gezeigt, dass ein fliegender Käfer versucht auszuweichen, wenn er seitlich von schräg unten mit IR bestrahlt wird [14]. Dabei waren die Strahlungsintensitäten moderat: Hielt man eine Hand an die Position des Käfers, konnte man lediglich eine geringe Erwärmung spüren. Wurden die IR-Organen für IR-Strahlung blockiert, so blieb auch die Ausweichreaktion aus – ein Zeichen dafür, dass hier die antennalen Thermorezeptoren nicht involviert sind.

Auf der anderen Seite ist es im Verlaufe der Verhaltensversuche nie gelungen, den Käfer mit schwacher IR-Strahlung anzulocken. Daher wird gegenwärtig angenommen, dass die IR-Rezeptoren von *Merimna* als Frühwarnsysteme für heiße Stellen dienen, die zum Einsatz kommen, wenn der Käfer auf einer aktiven Brandfläche herumfliegt, um Nahrung und Kopulationspartner zu finden. Interessant ist noch, dass gelegentlich Käfer gefunden werden, die nur am 2. Abdominalsegment ein Paar IR-Rezeptoren ausgebildet haben, jedoch werden auch Individuen gefunden, die drei Paar IR-Rezeptoren am 2.–4. Abdominalsegment aufweisen. Für Sinnesorgane ist eine solche Variabilität eher ungewöhnlich. Eine mögliche Interpretation wäre, dass der IR-Sinn bei *Merimna* evolutionär noch relativ jung ist und sich die endgültige Anzahl der IR-Organen erst noch herauskristallisieren muss.

ABB. 9 | DIE THORAKALEN IR-REZEPTOREN VON ACANTHOCNEMUS



a) REM-Aufnahme einer Ventralansicht des Vorderkörpers von *Acanthocnemus*. Die IR-Organen liegen links und rechts unmittelbar vor den Hüften (Coxen) der Vorderbeine (Pfeil). b) Einzelnes IR-Organ (Kopf befindet sich links). Die IR-absorbierende Scheibe ist hinten mit einem kleinen Stiel (Pfeil) am Körper befestigt und wird so über der darunterliegenden Grube gehalten. Im vorderen Bereich der Scheibe liegen die kleinen thermosensitiven Sensillen. c) Längsschnitt durch ein einzelnes IR-Sensillum im Randbereich der Scheibe. Von dem kleinen äußerlich sichtbaren Zapfen verläuft ein elektronendichter (= schwarzer) Stab durch den Kanal in der Kutikula zu einer unterhalb der Kutikula liegende Sinneszelle. d) Somata der im Inneren der Scheibe liegenden Sinneszellen. Ein großer Zellkern ist sichtbar (ZK). Die Somabereiche sind durch hineinziehende Ausläufer von Gliazellen kompartimentiert und enthalten viele Mitochondrien (Mi).

Thorakale IR-Rezeptoren beim Kleinen Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*)

Wie bei *Merimna* sind auch die IR-Rezeptoren des nur wenige Millimeter großen Kleinen Aschekäfers einzigartig im Tierreich. Äußerlich sichtbar ist auf jeder Seite des ersten Thoraxsegments je eine kleine Scheibe, die direkt vor der Basis des linken bzw. rechten Vorderbeins angeordnet ist (Abbildung 9a) [15]. Die Oberfläche der Scheibe dient hier als IR-Absorber. Im Unterschied zum IR-Rezeptor bei *Merimna* sind die morphologischen Verhältnisse jedoch komplexer. Unter der Scheibe befindet sich eine luftgefüllte Grube, und die Scheibe wird nur an einer Stelle durch einen kleinen Stiel über dieser Grube gehalten (Abbildung 9b). Über den die Grube umgebenden Spalt steht die Luft in der Grube mit der Außenluft in Verbindung. Dies dient offensichtlich der Verringerung der thermischen Masse der Scheibe: Bei IR-Bestrahlung erwärmt sich die Scheibe schnell und kühlt bei Unterbrechung der Bestrahlung auch entsprechend schnell wieder ab. Im Einklang mit dieser Interpretation

sind auch die Thermosensoren im vorderen Bereich der Scheibe zu finden, der sich am schnellsten erwärmt und abkühlt. Es handelt sich hier um ca. 90 miniaturisierte Sensillen, deren kleine Kutikulazapfen von außen sichtbar sind (Abbildung 9b).

Nach bisherigem Wissensstand handelt es sich hier auch – genauso wie bei den photomechanischen IR-Rezeptoren – um modifizierte kutikuläre Haar-Mechanorezeptoren. An den ursprünglichen Mechanorezeptoren hat die Evolution jedoch auf andere Weise angegriffen. Das Haar wurde nur moderat modifiziert, indem es stark reduziert wurde. Tiefgreifende Modifikationen gab es hingegen

GLOSSAR

MWIR-Strahlung: Mid-Wavelength-IR-Strahlung im Wellenlängenbereich von 3–8 μm . Hier liegt das Emissionsmaximum elektromagnetischer Strahlung von Waldbränden, bei denen Temperaturen von bis zu 1.000 °C auftreten können. Da in diesem Bereich auch ein atmosphärisches Fenster existiert, in dem die Gase der Atmosphäre wie Kohlendioxid und Wasserdampf die IR-Strahlung nicht absorbieren, kann mit einem in diesem Fenster messenden IR-Sensor ein Waldbrand sogar aus dem Weltraum detektiert werden.

Pyrophile Insekten: Darunter versteht man eine vergleichsweise kleine Gruppe von ca. 50 Arten, die in den ersten Tagen, Wochen und Monaten signifikant häufiger auf Brandflächen als auf benachbartem unverbranntem Land gefunden werden können. Dies sind in erster Linie Käfer und Wanzen; bei einigen Arten handelt es sich auch um Fliegen und Schmetterlinge. Infrarotrezeptoren als Spezialanpassung an die pyrophile Lebensweise wurden innerhalb dieser Gruppe bisher nur bei den hier vorgestellten Käfern und Wanzen gefunden.

Sensillen: Die Sensillen der Insekten werden im Deutschen auch als „Kleinsinnesorgane“ bezeichnet. Es handelt sich um miniaturisierte Sensoren für alle Umweltreize, deren Wahrnehmung für das jeweilige Insekt wichtig ist. Da Insekten ein Exoskelett aus Kutikula besitzen, sind die Sensillen in dieses eingebettet. Daher verfügen sie auch über einen sog. äußeren Kutikulaapparat. Bei einer mechanosensitiven Borste sind das z. B. die Borste und die zugehörigen basalen Sockelstrukturen. Unterhalb des Kutikulaapparats liegen die Sinneszellen.

Tubularkörper: Für mechanosensitive Sinneszellen, die kutikuläre Mechanorezeptoren innervieren, charakteristische Struktur des Cytoskeletts. Tubularkörper liegen in den distalen Spitzen der Dendriten und bestehen aus dichten Bündeln von Mikrotubuli, die miteinander verkittet sind. Bei mechanischen Deformationen der Zellmembran dienen sie als inneres Widerlager und begünstigen daher das Öffnen von mechanosensitiven Ionenkanälen.

Wallace-Linie: Es handelt sich bei dieser in der Mitte des 19. Jahrhunderts von Thomas Henry Huxley nach Alfred Russel Wallace benannten Linie um eine biogeografische Grenze. Sie verläuft zwischen Bali und Lombok, Borneo und Sulawesi und dann weiter in östlicher Richtung südlich der Philippinen. Sie markiert die Trennung zwischen asiatischer und australischer Fauna.

bei der Sinneszelle. Während diese bei den photomechanischen Rezeptoren nicht erkennbar abgewandelt wurde, hat sie bei den IR-Rezeptoren auf der Scheibe sowohl morphologische als auch funktionale Änderungen erfahren. Während die distale Spitze des Dendriten bei Haar-Mechanorezeptoren und photomechanischen IR-Sensillen in direktem Kontakt zum Kutikulaapparat steht und an der Verbindungsstelle einen Tubularkörper aufweist, ist beim *Acanthocnemus*-IR-Sensillum der gesamte äußere Teil des Dendriten komplett reduziert und steht daher mit dem kleinen Zapfen nicht mehr in Verbindung. Anstelle des Dendriten ist nach elektronenmikroskopischen Befunden ein sogenannter „elektronendichter Stab“ nicht genau bekannter Herkunft zu finden, der aus extrazellulärem, kutikulaartigem Material besteht. Der Stab ist mit der Basis des Zapfens verbunden (Abbildung 9c), durchzieht den sich durch die Kutikula erstreckenden Dendritenkanal und ist direkt unterhalb der Kutikula mit dem Rest des Dendriten der Sinneszelle verbunden. Die mögliche Funktion dieses Stabes wird erkennbar, wenn man berücksichtigt, dass die Sinneszelle nun nicht mehr als Mechanorezeptor, sondern als Thermorezeptor fungiert [16]. So wurde postuliert, dass der Stab als möglicher Wärmeleiter fungieren könnte, der Wärmeenergie, die durch IR-Absorption in den äußeren Schichten der Kutikula entsteht, zur unterhalb der Kutikula angeordneten Sinneszelle leitet. Die Sinneszelle zeigt ein ähnliches elektrisches Verhalten wie die thermorezeptive multipolare Sinneszelle im IR-Organ von *Merimna*, indem sie ständig Aktionspotenziale generiert (als Spontanaktivität bezeichnet) und Änderungen der Temperatur mit Änderungen in der Feuerrate beantwortet. Eine weitere strukturelle Veränderung besteht darin, dass im Inneren der Sinneszelle zahlreiche Mitochondrien zu finden sind (Abbildung 9d). Große Mengen von Mitochondrien wurden auch in der TDM des multipolaren Neurons im *Merimna* IR-Organ gefunden.

Bisherige elektrophysiologische Untersuchungen am IR-Organ von *Acanthocnemus* weisen im Vergleich zum IR-Organ von *Merimna* auf eine etwas höhere Empfindlichkeit hin. Wenn man berücksichtigt, dass der kleine Käfer nicht schnell fliegen kann, so ist es auch hier unwahrscheinlich, dass er sein IR-Organ nutzt, um Waldbrände aus größerer Entfernung zu detektieren. Deshalb ist auch bei *Acanthocnemus* zu vermuten, dass die IR-Organe als Frühwarnsysteme vor *hot spots* genutzt werden, wenn der Käfer auf der aktiven Brandfläche einen Landeplatz auf einem Aschefeld sucht.

Zusammenfassung

Infrarot-(IR)-Rezeptoren bei Insekten sind bisher nur bei Vertretern von drei Käfer- und einer Wanzenart gefunden worden, die alle Waldbrände anfliegen und daher als pyrophil bezeichnet werden. Auf den frischen Brandflächen dienen die IR-Rezeptoren als Frühwarnsysteme, mit deren Hilfe eine Landung auf einer heißen Stelle vermieden werden kann. Bei Prachtkäfern der Gattung *Melanophila* gibt es

jedoch Hinweise darauf, dass die IR-Rezeptoren auch zur Ortung von Waldbränden aus größeren Entfernungen dienen können. Da sich die pyrophile Lebensweise bei den vier Gattungen unabhängig voneinander entwickelt hat, gibt es auch keinen „Standard-IR-Rezeptor“. So haben sich bei *Melanophila*-Käfern und pyrophilen *Aradus*-Rindenwanzen auf Mechanosensorik basierende, sogenannte photomechanische IR-Rezeptoren entwickelt. Beim Australischen Feuerkäfer (*Merimna atrata*) und beim Kleinen Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*) findet man hingegen thermische IR-Rezeptoren, bei denen ein durch IR-Absorption hervorgerufener Temperaturanstieg des Rezeptors gemessen wird.

Summary

Infrared receptors in pyrophilous insects

So far, infrared (IR) receptors in insects have only been found in representatives of three beetle genera and one hemipteran genus, all of which fly to forest fires and are therefore referred to as pyrophilous. On freshly burned areas, the IR receptors serve as early warning systems that can be used to avoid landing on a hot spot. However, there is evidence in jewel beetles of the genus *Melanophila*, that the IR receptors may also serve to locate forest fires from greater distances. As the pyrophilous lifestyle has evolved independently in the four genera, no “standard IR receptor” exists. Mechanosensory-based, so-called photomechanic IR receptors have evolved in *Melanophila* beetles and pyrophilous *Aradus* bark bugs. In the Australian fire beetle *Merimna atrata* and in the small ash beetle *Acanthocnemus nigricans*, on the other hand, thermal IR receptors are found, in which an increase in temperature caused by IR absorption is measured.

Schlagworte

Waldbrand, Feuerökologie, Infrarotrezeptor, pyrophile Insekten

Literatur

- [1] H. Altner, R. Loftus (1985). Ultrastructure and function of insect thermo- and hygrosensors. *Ann. Rev. Entomol.* 30, 273–295.
- [2] L. M. Zopf et al. (2014). Infrared detection without specialized infrared receptors in the bloodsucking bug *Rhodnius prolixus*. *J. Neurophysiol.* 112, 1606–1615.
- [3] A. Schmitz et al. (2015). Behaviour of the Australian ‘fire-beetle’ *Merimna atrata* (Coleoptera: Buprestidae) on burnt areas after bushfires. *Records of the Western Australian Museum* 30, 1–11.
- [4] W. G. Evans (1962). Notes on the biology and dispersal of *Melanophila* (Coleoptera: Buprestidae). *Pan-Pacific Entomol.* 38, 59–62.
- [5] M. Geiser (2016). An update on the distribution of the pyrophilous beetle *Acanthocnemus nigricans* (Hope, 1845) (Coleoptera: Cleroidea: Acanthocnemidae), including new records from Laos. *Entomologica Basiliensia et Collections Frey* 36, 429–432.
- [6] T. Johansson et al. (2010). Responses of eight boreal flat bug (Heteroptera: Aradidae) species to clear-cutting and forest fire. *Journal of Insect Conservation* 14, 3–9.
- [7] T. Vondran et al. (1995). The infrared receptor of *Melanophila acuminata* De Geer (Coleoptera: Buprestidae): Ultrastructural study of a unique insect thermoreceptor and its possible descent from a hair mechanoreceptor. *Tissue & Cell* 27, 645–658.
- [8] A. Schmitz et al. (2010). Distribution and functional morphology of photomechanic infrared sensilla in flat bugs of the genus *Aradus* (Heteroptera, Aradidae). *Arthropod Structure & Development* 39, 17–25.
- [9] A. Schmitz et al. (2007). The analysis of the mechanosensory origin of the infrared sensilla in *Melanophila acuminata* (Coleoptera; Buprestidae) adduces new insight into the transduction mechanism. *Arthropod Structure & Development* 36, 291–303.
- [10] H. Schmitz, H. Bousack (2012). Modelling a historic oil-tank fire allows an estimation of the sensitivity of the infrared receptors in pyrophilous *Melanophila* beetles. *Plos One* 7, e37627.
- [11] H. Schmitz et al. (2000). A new type of infrared organ in the Australian “fire-beetle” *Merimna atrata* (Coleoptera: Buprestidae). *Naturwissenschaften* 87, 542–545.
- [12] H. Schmitz et al. (2001). Morphology of a thermosensitive multipolar neuron in the infrared organ of *Merimna atrata* (Coleoptera, Buprestidae). *Arthropod Struct Development* 30, 99–111.
- [13] H. Schmitz, S. Trenner (2003). Electrophysiological characterization of the multipolar thermoreceptors in the “fire-beetle” *Merimna atrata* and comparison with the infrared sensilla of *Melanophila acuminata* (both Coleoptera, Buprestidae). *Journal of Comparative Physiology A* 189, 715–722.
- [14] M. Hinz et al. (2018). The impact of infrared radiation in flight control in the Australian “firebeetle” *Merimna atrata*. *Plos One* 13, e0192865.
- [15] E. J. Kreiss et al. (2005). Morphology of the prothoracic discs and associated sensilla of *Acanthocnemus nigricans* (Coleoptera, Acanthocnemidae). *Arthropod Structure & Development* 34, 419–428.
- [16] E.-J. Kreiss et al. (2007). Electrophysiological characterisation of the infrared organ of the Australian “Littel Ash Beetle” *Acanthocnemus nigricans* (Coleoptera, Acanthocnemidae). *J. Comp. Physiol. A* 193, 729–739.

Feuerkäfer in Aktion
Das Video auf YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=Cjk0kM294A>) zeigt das Verhalten von *Merimna* und *Acanthocnemus* auf einer Brandfläche in Westaustralien.

Verfasst von:



Helmut Schmitz studierte Biologie in Bochum und Düsseldorf und promovierte 1991 an der Universität Erlangen-Nürnberg über Temperaturregulation bei Tagfaltern. Nach dem Wechsel an die Universität Bonn erfolgte dort 2001 die Habilitation. Seit der Promotion liegt das Arbeitsgebiet von Helmut Schmitz auf dem Gebiet der Thermo- und Infrarotsensorik bei Insekten. Seit 1999 wurden dabei im Rahmen von jährlichen Forschungsaufenthalten in Westaustralien die IR-Rezeptoren von pyrophilen australischen Käfern und Wanzen untersucht.



Anke Schmitz studierte Biologie an der Universität Erlangen-Nürnberg und promovierte dort 1996 mit einer Arbeit über die Morphologie der Stigmen von Insekten. Die Habilitation erfolgte 2004 an der Universität Bonn. Anke Schmitz arbeitete licht- und elektronenmikroskopisch u. a. am Atmungssystem von Spinnen, an der Seitenlinie von Fischen und aktuell arbeitet sie zusammen mit Helmut Schmitz an den IR-Rezeptoren von pyrophilen Insekten.

Korrespondenz

Dr. Helmut Schmitz
Institut für Zoologie
Universität Bonn
Meckenheimer Allee 169
53115 Bonn
Email: h.schmitz@uni-bonn.de



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM
FÜR DIE**

BIEWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland.
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten.
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf.
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“.
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie.



www.vbio.de

Jetzt beitreten!

