

Wie Bienen sehen

Text und Fotos: Gerhard Martin

Bienen sind in den meisten Regionen der Welt die wichtigsten Bestäuber. 80% aller Blütenpflanzen werden vom Insekten bestäubt. 85% dieser 80% davon sind Bienen, bei Obstbäumen sind es sogar 90%.

Sie bestäuben mehr als 170.000 Pflanzenarten. Das bedeutet, dass sie Generalisten sind, die mit fast allen Blüten klar kommen. Schätzungsweise 40.000 Arten davon sind auf Bienen angewiesen.

Aber selbst bei Pflanzen, die vor allem durch Wind bestäubt werden, wie zum Beispiel Raps, haben Landwirte festgestellt, dass die Erträge deutlich höher ausfallen, wenn Bienen zusätzlich die Bestäubungsarbeit übernehmen (Information des Berufsimkers Andreas Gerber aus Hilgendorf).

Allein diese kurze Einführung mit Informationen vor allem von Prof. Tautz, Verfasser zahlreicher Bücher zum Thema Bienen, macht deutlich, welche große Bedeutung Bienen für unsere Welt und damit auch für uns Menschen haben.

Umso wichtiger ist es, Bienen nicht nur als Honiglieferanten zu sehen, sondern alle Facetten ihres faszinierenden Lebens besser verstehen zu können. Nur so werden wir ihren Wert für unsere Welt besser schätzen lernen und unser Denken und Handeln verbessern können.

Wie Bienen sehen ist nur eine, aber nicht die einzige „Facette“. Im September 2021 konnte die Mikro-Gruppe zum ersten Mal nach einer langen Lock-down-Zeit wieder zusammen kommen und dieses Thema nicht nur im Vortrag sondern praktisch erfahren lernen. Der nachfolgende Beitrag kann daher nur ansatzweise die Informationen wiedergeben, die im Rahmen einer solchen Veranstaltung vermittelt werden können.

Bienen leben den größten Teil ihres Lebens in der Dunkelheit ihres Bienenstocks. Sie müssen sich daher sowohl in der Dunkelheit als auch bei Tageslicht orientieren können. Außerhalb ihres Bienenstocks sind sie darauf angewiesen, ihr Ziel, egal ob Blüte, Wasserstelle oder Stockeingang zu erkennen. Dazu besitzen sie zwei Formen von Lichtsinnesorganen, die seitlich am Kopf sitzenden Komplex-oder Facettenaugen und drei im Dreieck auf der Stirn angeordnete Linsenaugen, die sogenannten Ocellen (Foto 1).

Die beiden Facettenaugen bestehen bei den Arbeiterinnen jeweils aus 5000 – 6000 sechseckigen Einzelaugen, den Ommatidien und haben einen Sehfeld von 360 Grad. Menschen haben ein Sehfeld von höchstens 180 Grad. Bei den männlichen Bienen, den Drohnen, sind es sogar 10.000 Einzelaugen je Facettenauge, weil ihre wichtigste Lebensfunktion darin besteht, die Königin beim Paarungsflug möglichst schnell erkennen zu können (Foto 2).

Jedes Einzelauge, jede einzelne Facette oder Ommatidium, nimmt nur einen kleinen Teil seiner Umgebung auf. Hinzu kommt, dass die Ommatidien entgegen den Linsenaugen der Menschen ihre Sehschärfe nicht an die Entfernung anpassen können. Das heißt, sie können mit den Augen nicht fokussieren, wie wir es permanent machen. Sie besitzen nur eine starre Linse, darunter einen Kristallkegel und darunter je Ommatidium 8 Sehzellen mit einem Lichtleiter. Sie haben nur eine Ebene, in der sie alles scharf sehen können. Dahinter und davor ist es unscharf. Man muss sich das vorstellen wie der Blick durch einen Fotoapparat mit einem Fotoobjektiv, das eine kleine Blendenzahl hat, z.B. Blende 3,5, und man kann mit dem Fotoapparat weder fokussieren noch zoomen.



Foto 1



Foto 2 Facettenaugen einer frisch geschlüpften Drohne

Während unser Auge wie ein Fotoapparat mit seiner Linse Licht sammelt und ein Bild auf die Netzhaut wirft, bestehen beide Facettenaugen einer Arbeiterin zusammen aus gut 11.000 Kleinkameras und das Gehirn der Biene setzt daraus ein großes Bild zusammen, wie ein Puzzle aus 11.000 Einzelbildern. Die Augen der Bienen bilden die Umwelt daher wie ein Raster ab, bei dem alles gleich scharf bzw. unscharf, aber sehr pixelig ist.

Die folgenden Fotos zeigen nur sehr begrenzt, wie man sich das vorstellen kann. Die Aufnahmen sind nur wie der Blick durch 36 viereckige und nicht 11.000 sechseckige Sammellinsen gemacht worden.



Foto 3: Scharbockskraut, so wie wir Menschen es sehen.

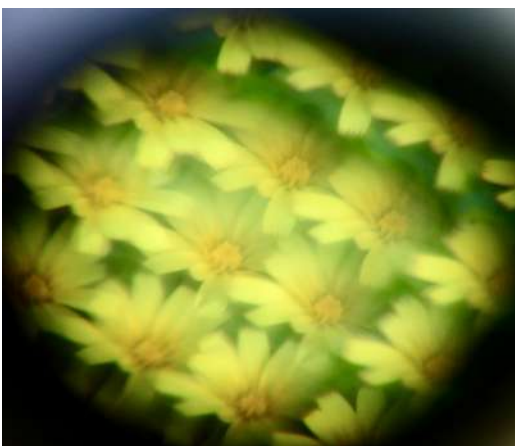


Foto 4: die am schärfsten mögliche Abbildung

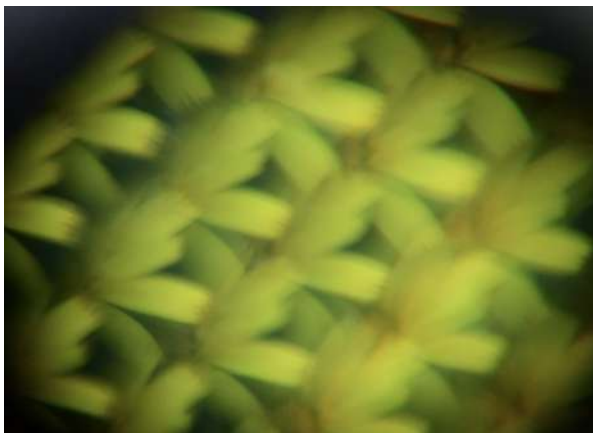


Foto 5: Aufnahme näher am Objekt

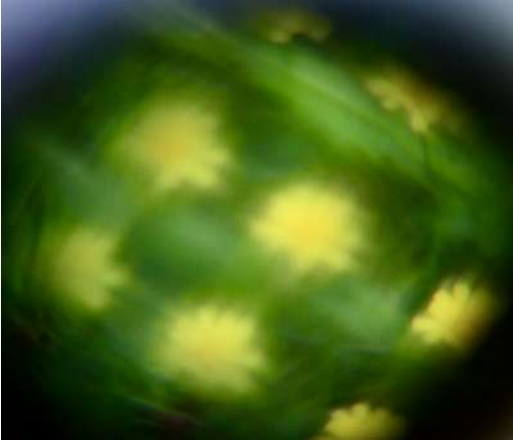


Foto 6: Aufnahme weiter entfernt vom Objekt



Foto 7: Blick auf ein Facettenauge: Das gesamte Auge verfügt über Tasthaare. Einige erkennt man nicht, weil sie genau in Richtung der Kamera stehen. Daher erscheint es nur so, als ob in der Mitte eine kahle Stelle sei.

Die Haare auf der Haut neben dem Auge sind hingegen „gefiedert.“

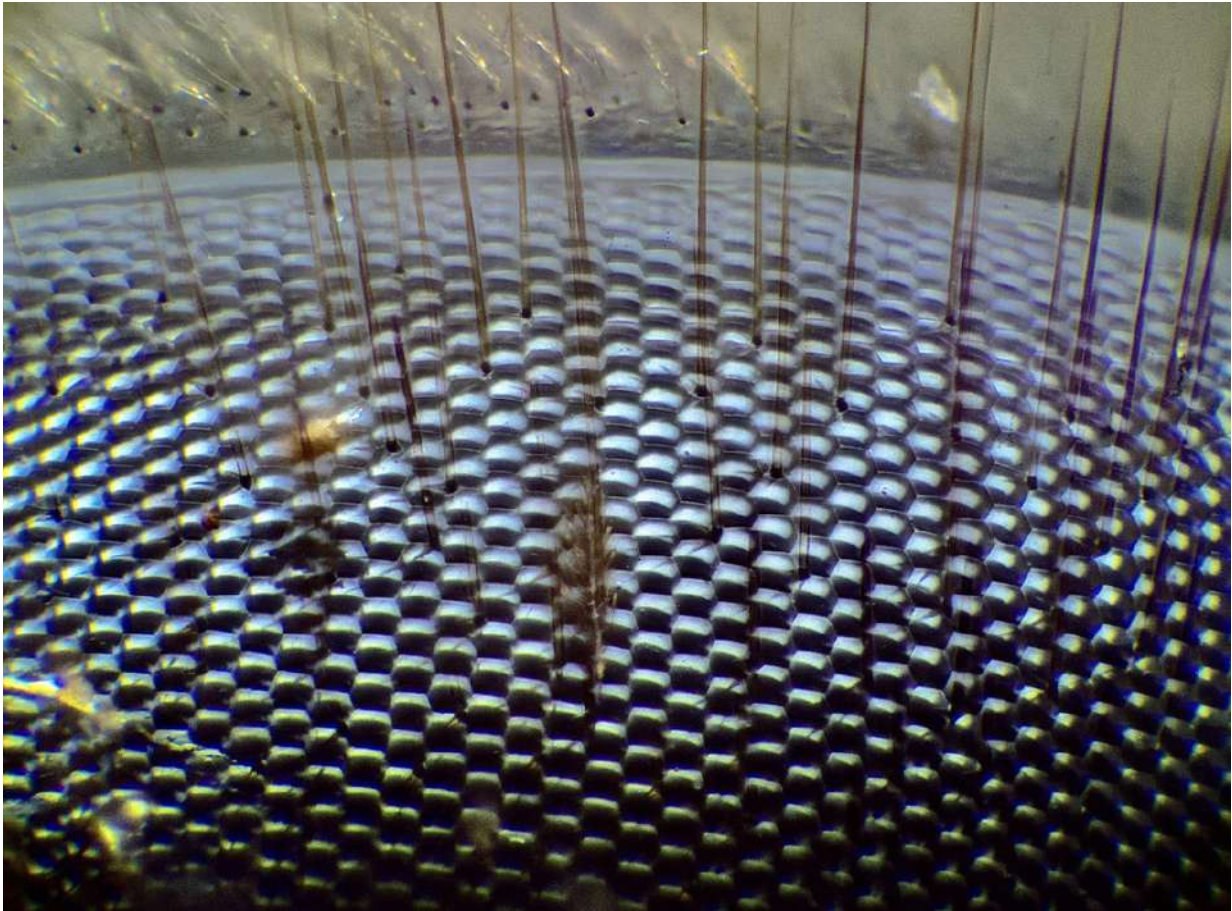


Foto 8: Man kann sehr deutlich erkennen, dass die Tasthaare aus Löchern zwischen den Ommatidien wachsen.

Sehen von Bewegungen

Ab einer Winkelgeschwindigkeit von etwa $0,02^\circ/s$ bis $0,2^\circ/s$, abhängig vom Hintergrundkontrast, kann ein Mensch mit seinen Linsenaugen Bewegungen erkennen. Das entspricht einem Motor, der etwa 30 Minuten für eine einzige Umdrehung benötigt. Schaut man beispielsweise auf das Rad eines Stromzählers, wie es sie heute häufig immer noch gibt, und hat man den Eindruck, dass sich das Rad nicht dreht, kann es sein, dass man sich täuscht und man stellt nach wenigen Minuten fest, dass sich die rote Markierung des Stromzählers doch weiter bewegt hat.

Im peripheren Bereich des menschlichen Gesichtsfeldes kann man lediglich Bewegungen bemerken, nicht aber bewegte Objekte identifizieren. Strecken sie dazu die Arme zur Seite aus und soweit nach hinten wie sie können. Schauen sie immer geradeaus auf diesen Text. Bewegen sie dann ihre Finger und kommen mit den Armen ganz langsam nach vorne. Sie werden bemerken, dass sich etwas bewegt. Sie können aber nicht sehen, was es ist. Erst wenn sie den Kopf zur Seite bewegen und ihre Finger mit den Augen fixieren, sehen sie sie scharf und deutlich.

Beutetiere oder Fressfeinde können von Bienen erst bei Bewegung wahrgenommen und bei der Zusammenrechnung der Formen jedes Einzelbildes der Bewegung erkannt werden. Aber ist dann nicht alles unscharf, wie es vorher beschrieben wurde?

Nein, mit den Facettenaugen kann die Biene die Welt viel schärfer sehen, wenn sie sich bewegt oder wenn sich das Objekt bewegt. Eine Biene kann nämlich bis zu 200 Einzelbilder/Sekunde

getrennt wahrnehmen. Zum Vergleich: Wir Menschen sehen ab etwa 15 bis 18 Bildern/Sekunde keine Einzelbilder mehr, sondern nehmen die Einzelbilder nur noch als Film wahr. Daher werden Fernsehaufnahmen oder Videofilme meist mit 24 Bildern/Sekunde aufgenommen und wiedergegeben.

Bienen sehen daher 10 mal schneller als Menschen und erkennen so Details, die wir als Menschen nicht mehr wahrnehmen können. Der Schlag nach einer Biene oder Fliege, die auch Facettenaugen besitzt, wird daher vom Insekt wie eine Zeitlupenbewegung wahrgenommen.

Vorstellen kann man sich das wie bei einem Hochgeschwindigkeitsfilm, der in einer Sekunde mehrere hundert Bilder aufnimmt. Lässt man diesen in der Geschwindigkeit von z.B. 20 Bildern/Sekunde ablaufen, also z.B. eine Zeitlupe, bei der das, was in 1 Sekunde abläuft, in 10, 20 oder 40 Sekunden gezeigt wird, sind wir in der Lage die einzelnen Bewegungen, z. B. den Flügelschlag eines Kolibris oder die schlingernde Bewegung eines abgeschossenen Pfeils zu erkennen. Wir erkennen dann auf einmal etwas, was wir vorher nicht sehen konnten, weil es für unser menschliches Auge zu schnell war.

Die hohe zeitliche Auflösung des Sehens, die Bienen im Gegensatz zu Menschen besitzen, bedeutet eine Verbesserung der Sehschärfe durch rasches optisches Abtasten bewegter Objekte im Gehirn. Das führt zu einer höheren räumlichen Bildauflösung und damit zu mehr Details, die zu Formen zusammengefügt und ausgewertet werden können, als es der begrenzten optischen Auflösung entspräche. Auch wir Menschen haben diese Fähigkeit. Sie können das testen, wenn sie noch einen alten Fernseher besitzen, der noch nicht in Full-HD-Qualität Filme zeigt. Schauen sie sich einen Film auf diesem Fernseher von weiter weg an, so erscheint ihnen das Bild scharf. Gehen sie aber ganz nah ran oder schauen sie sich ein Standbild an, dann erkennen sie, dass es viel unschärfer ist.

Bienen mit ihren Facettenaugen verfügen nicht nur über ein größeres sondern auch schärferes Blickfeld als Menschen, da jedes einzelne der über einen weiten Winkel angeordnete Ommatidium, jede einzelne Facette, die gleiche Auflösung erreicht. Bei dem Linsenauge eines Menschen ist die scharfe Abbildung auf die Bildmitte beschränkt und wird zum Rand des Blickfeldes hin immer unschärfer. Machen sie selbst einen Test:

Blicken sie stur geradeaus auf diesen Text und damit auf das Wort, das sie gerade lesen. Blicken sie nur auf dieses Wort und nicht nach rechts oder links. Sie werden merken, dass sie vielleicht noch die beiden Worte rechts und links lesen können, auf keinen Fall aber die Worte am rechten oder linken Rand dieser Zeile. Das können wir nur lesen, weil wir permanent jedes Wort neu fixieren.

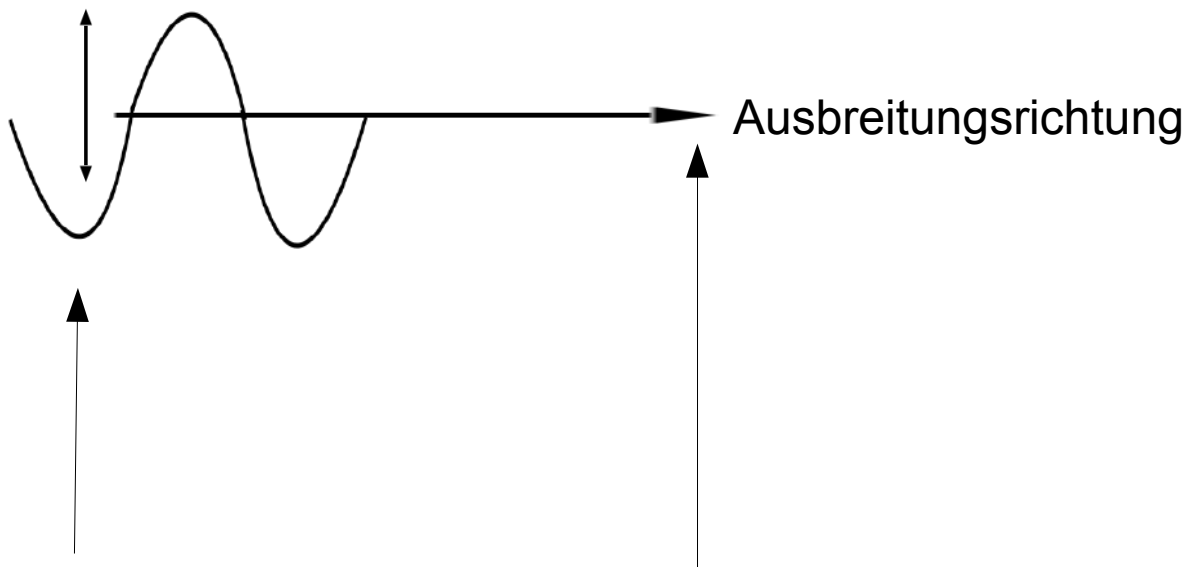
Für die Wissenschaft ist diese Kenntnisse so interessant, dass mit künstlich hergestellte Facettenaugen experimentiert wird, weil man so sehr schnell Objekte und deren Bewegungen über einen weiten Blickwinkel erkennen kann. Für die medizinische Diagnose mit Endoskopen erhofft man sich dadurch einen Vorteil, da diese Facettenkameras keine beweglichen Linsen zum fokussieren benötigen und besonders klein sein können.

Polarisiertes Himmelslicht sehen können

Bienen haben die Fähigkeit, die Polarisation des blauen Himmelslichtes für ihre Orientierung zu nutzen. Sie sehen am blauen Himmel ein Polarisationsmuster und können daraus die Himmelsrichtung ablesen. Die Kenntnis über die Polarisation des Himmelslichtes hilft den Bienen die Futterplätze, z.B. eine blühende Wiese, oder zurück zu ihrem Bienenstock zu finden.

Das Polarisationsmuster am Himmel ist ein Muster, das sich ergibt, wenn das Sonnenlicht an den Luftmolekülen der Erdatmosphäre gestreut wird. Am stärksten gestreut wird Licht kurzer Wellenlänge (blau oder ultraviolett).

Polarisiertes Licht ist eine Transversalwelle, d.h. Sie schwingt wie eine Wasserwelle rauf und runter und in eine Richtung. Dazu sagt man: Sie schwingt „senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung“.



Senkrecht rauf und runter

hier nach rechts ausbreitend

Schwingt das Licht in alle Richtungen, so spricht man von unpolarisiertem Licht, wie das Licht, was von der Sonne kommt. Wenn Licht aber nur in einer Ebene schwingt, wie oben dargestellt, dann nennt man es linear polarisiert.

Trifft das Sonnenlicht auf die Erdatmosphäre und damit z.B. auf die Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle, so wird ein Teil des Lichtes gestreut (Rayleigh-Streuung) und reflektiert. Dadurch wird dem Licht eine bestimmte Schwingungsrichtung aufgezwungen, es ist polarisiert.

Vorstellen kann man sich das wie eine Lichtwelle, die nicht nur rauf und runter sondern auch nach rechts oder links bzw. in alle Richtungen schwingt. Wenn diese Lichtwelle auf ein senkrechtes Gitter mit Stäben trifft, dann gehen nur noch die Wellen durch, die in die Ausbreitungsrichtung hinter das Gitter verlaufen und genau zwischen den senkrechten Stäben des Gitters hindurchpassen. Alle anderen Wellen, die nicht genau diese Ausbreitungsrichtung und diese Wellenrichtung haben, prallen an dem Gitter ab.

Zunutzen machen sich Menschen diese Eigenschaft, wenn sie vor dem Objektiv ihres Fotoapparates einen Polarisationsfilter schrauben. Fotografiert man dann ein sich spiegelnde Fläche, z. B. eine Wasseroberfläche oder fotografiert man durch eine Fensterscheibe dann kann man durch Drehen am Polarisationsfilter die Reflektionen, z.B. des Himmels oder zumindest einen Teil davon eliminieren. Auch bei etwa teureren Sonnenbrillen verwendet man polarisierte Brillengläser, um nicht geblendet zu werden. Die Filter bestehen aber nicht aus Stäben, wie ich es zum Verständnis oben erklärt habe, sondern nach einem von Edwin Herbert Land entwickelten Verfahren aus makromolekularen Folien mit Silbernanopartikeln, an denen die Lichtwellen gestreut werden.

Um sich praktisch vorstellen zu können, dass durch das Auftreffen der Sonnenstrahlen auf die Atmosphäre tatsächlich polarisiertes Licht zur Erde gelangt, habe ich eine Polarisationsfolie gekauft, sie in acht gleiche Dreiecke geschnitten und auf eine Glasscheibe geklebt. Ich habe sie so ausgeschnitten, dass die „Stäbe“ dieser 8 Dreiecke dabei alle gleich verliefen, hier längs zur langen Spitze. Jeder Teilnehmer unserer Veranstaltung im September konnte mit Hilfe diese Achtecks selbst erkennen, in welcher Richtung die Sonne steht, selbst wenn man sie nicht sehen konnte.

Nötig war aber zumindest ein kleiner blauer Fleck am Himmel.



Foto 9: Hält man die Polarisationsfolie (die die Funktion des Analysators übernimmt) in Richtung der Sonne, so erkennt man faktisch keinen Unterschied bei der Lichtdurchlässigkeit.

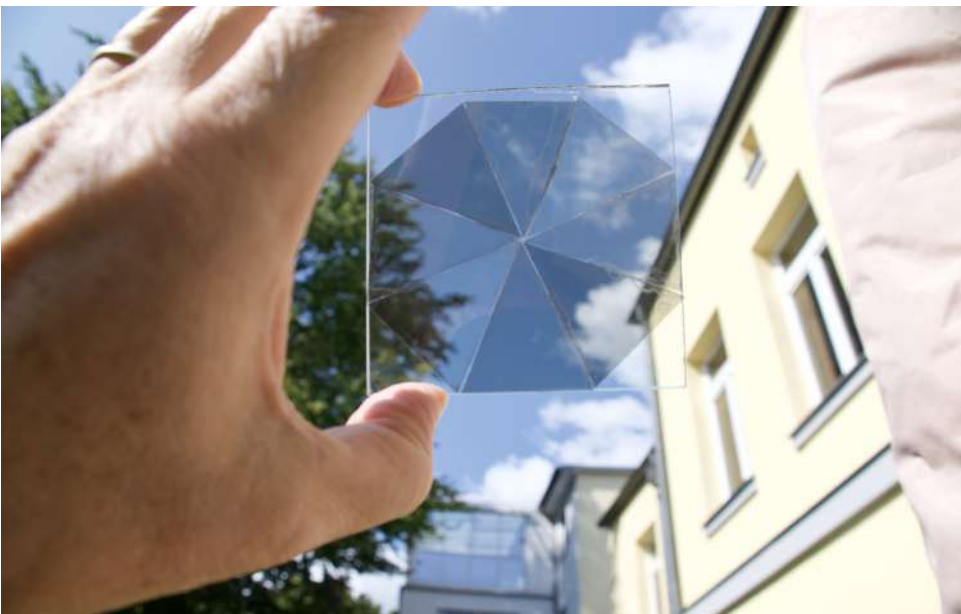


Foto 10: Hält man jedoch die Folie in eine andere Richtung gegen den blauen Himmel, sieht man dass die Foliendreieck am hellsten sind, die senkrecht, also im 90° -Winkel zur Sonne stehen. Zur Sonne hingewandt (siehe auch die Sonnenstrahlen auf meiner Handfläche) wirkt die Folie am dunkelsten, weil hier deutlich mehr Strahlen am Gitter abprallen.

Dass es zwischen ganz dunkel und ganz hell noch Zwischentöne gibt, hängt damit zusammen, dass die Verdeutlichung mit dem Gitter die Realität nicht ganz richtig wiedergibt. Am ehesten kann man sich das noch so vorstellen, dass die Gitterstäbe so breit sind, dass Abweichungen von der einen Transversalwelle durch benachbarte Transversalwellen begrenzt möglich sind. Außerdem entsteht durch die Streuung am Himmel ein Polarisationsmuster, auf das weiter unten eingegangen wird. Am deutlichsten wird der Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und rechtem Winkel noch vor einem Computerbildschirm (Foto 12), bei dem die Streuung der Lichtwellen monokausaler ist als am 'Himmel.

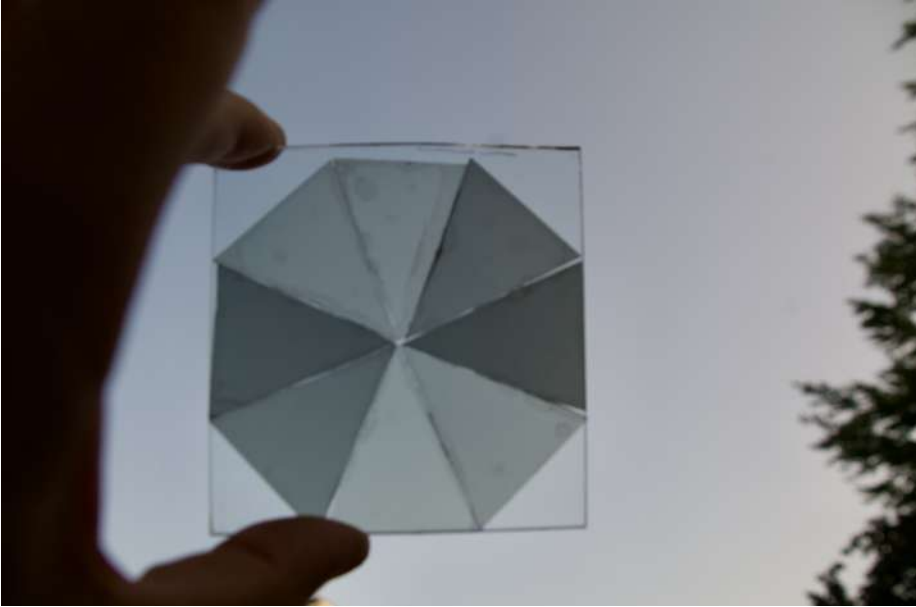


Foto 11 zeigt deutlich, dass bei untergehender Sonne das meiste polarisierte Licht fast senkrecht von oben kommt.

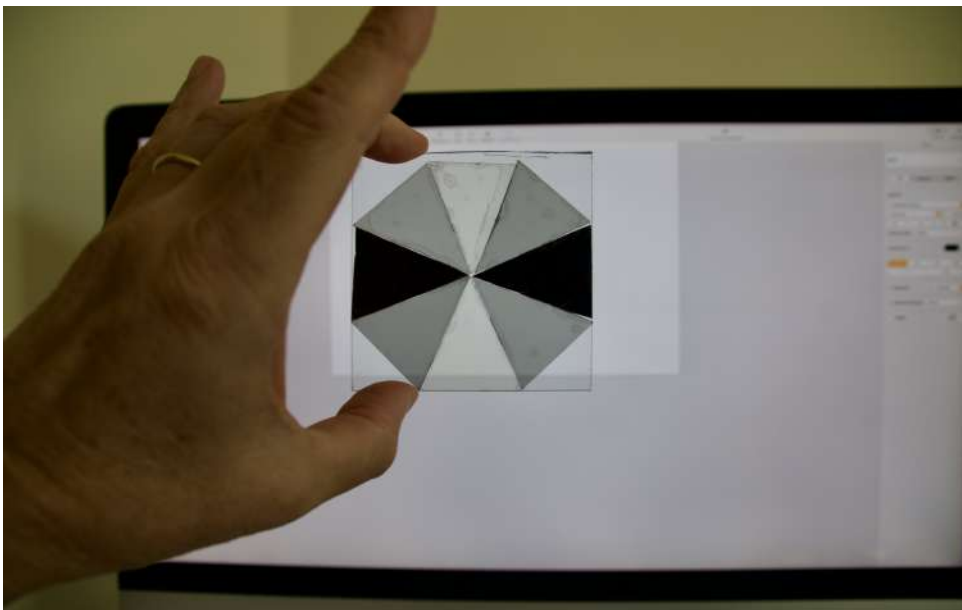


Foto 12 zeigt, dass Computerbildschirme fast alle mit polarisiertem Licht arbeiten.

In einem weiteren Versuch von Wasser mit Milch konnte ich das noch einmal anders verdeutlichen. Trifft Licht auf Objekte, hier: einige wenige Tropfen Milch in Wasser, die kleiner sind als die Wellenlängen des Lichts, so werden die Ladungen der Objekte zu Schwingungen angeregt und strahlen ihrerseits in alle Richtungen. Das Phänomen nennt man Streuung.

Schwingen die Ladungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, handelt es sich um polarisiertes Licht.

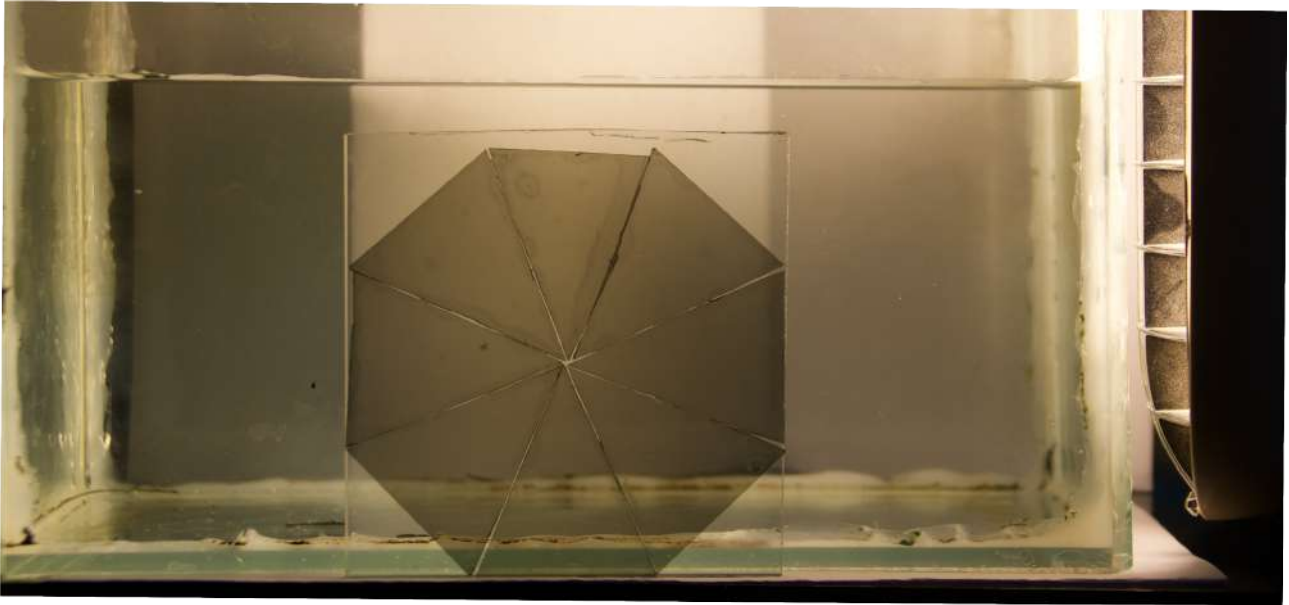


Foto 13 zeigt rechts die Lichtquelle. Im Aquarium selbst befindet sich nur Wasser.

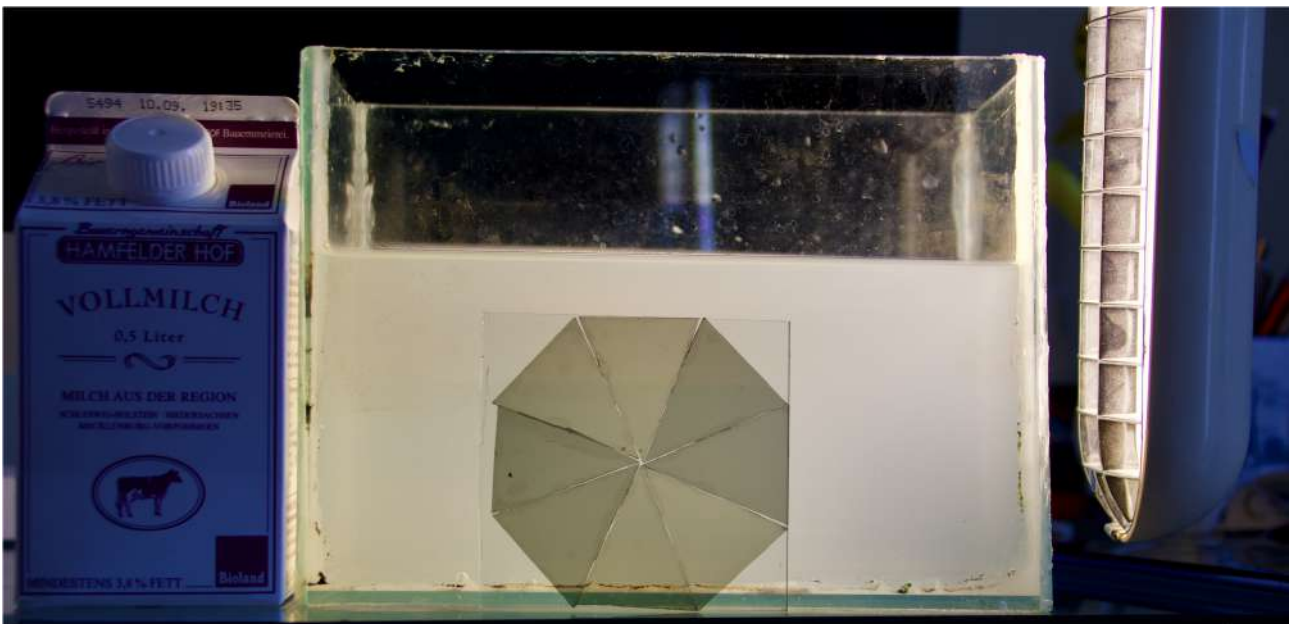


Foto 14 zeigt Wasser mit einem kleinen Schuss Milch. Die hellsten Dreiecke, also die größte Durchgängigkeit des polarisierten Lichtes zeigt sich im rechten Winkel zur Lichtquelle rechts.

Am Himmel befindet sich die Vorzugsrichtung der Schwingungen an jedem Punkt etwas anders. Dadurch entsteht ein Art Kreis-Muster, das man als Polarisationsmuster bezeichnet. Es ist äußerst schwierig dies zu fotografieren. Ich habe im Internet nur eine Aufnahme gefunden, die das Institutes für Technologie der Universität von Massachusetts gemacht haben soll, bei denen ich aber nicht nachfragen konnte, ob ich die Aufnahme veröffentlichen darf, weil sie auf deren Internetseite selbst nicht mehr zu finden war.

Da ein Ausschnitt des Polarisationsmuster in einem blauen Himmelsfleck zur Orientierung für die Bienen genügt, müssen die Bienen Kenntnisse des Gesamtmusters haben und in der Lage sein, den gesehenen Ausschnitt in das vorher im Gehirn gespeicherte Gesamtbild einzuordnen. So zumindest dachte man sich das früher. Bienen verfügen daher über eine Himmelskarte, die sie mit dem gesehenen Muster am Himmel vergleichen. Das Muster ermöglicht den Sonnenstand zu orten und

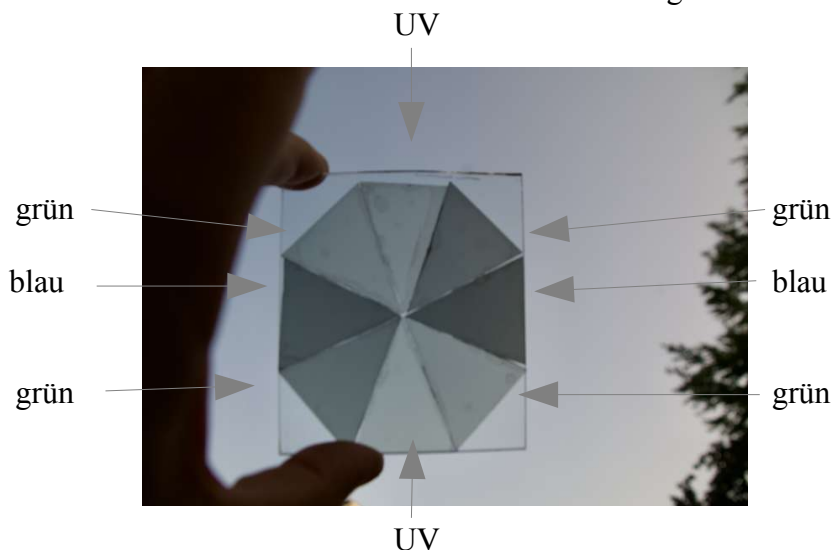
die Himmelsrichtungen richtig zu interpretieren. Wissenschaftler vom Biozentrum der Universität Würzburg haben die elektrische Aktivität gemessen, mit denen Nervenzellen (hier die Sehzellen der Ommatidien mit ihren Mikrovilli (den fadenförmigen Zellfortsätzen die im Lichtleiter gebündelt werden) auf die Richtung reagieren, in der das Licht schwingt. Dabei stellten sie fest, dass bestimmte Orientierungen des polarisierten Lichtes eine maximale Aktivität der Nervenzellen auslösten, also unterschiedlich wahrgenommen werden.

Bei geschlossener Wolkendecke fliegen Bienen weit aus weniger, wenn man mal darauf achtet. Dass sie aber dennoch zumindest zum Teil fliegen, macht deutlich, dass sie zur Orientierung bei ihren Flügen noch weitere Hilfsmittel haben. Das ist zum einen der Magnetkompass und zum anderen die Duftmarkierungen, die sie für ihre Artgenossinnen als Orientierungshilfe einsetzen.

Bisher war man, wie oben bereits angedeutet, der Ansicht, dass die Bienen dieses Polarisationsmuster im Gehirn abspeichern und mit dem gesehenen Polarisationsmuster am Himmel vergleichen, um beispielsweise wieder zu ihrem Bienenstock zurück zu finden. Seit 2003 ist man jedoch durch die Untersuchungen der Struktur der Facettenaugen der Ansicht, dass Bienen in ihrem Auge selbst eine Himmelskarte besitzen.

Wenn ich polarisiertes Licht sehen will, brauche ich einen Analysator, also z.B. eine Sonnenbrille mit einer Polarisationsfolie. Als Analysator eignen sich bei Bienen die Photorezeptoren der acht Sehzellen jedes Ommatidiums, wenn deren Mikrovilli (fadenförmige Zellfortsätze, die in den Lichtleiter (das Rhabdomer) hineinragen und diesen dann bilden, über die gesamte Länge exakt parallel ausgerichtet sind. In großen Teilen der Facettenaugen ist diese Vorbedingung aber nicht erfüllt. Die Sehzellen sind vielmehr um ihre Längsachse verdrillt.

In einem schmalen Feld entlang der oberen Augenregion jedoch, der sogenannten POL-Region, sind alle Mikrovilli der Sehzellen exakt parallel zueinander ausgerichtet. Weil auch die Rhodopsinmoleküle (die lichtempfindlichen Sehpigmente) in den Membranen der Mikrovilli gleichartig ausgerichtet sind, gewinnen die Mikrovilli die Eigenschaft eines Analysators. Das bedeutet, dass die unverdrillten Mikrovilli in den Lichtleitern (Rhabdomeren) der POL-Region wie ein Polarisationsgitter Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung durchlassen oder absorbieren. In einem einzelnen Ommatidium (Facette eines Facettenauges) sind die Mikrovilli in zwei Richtungen ausgerichtet, die senkrecht zueinander stehen. Sie haben daher in etwa die gleiche Struktur, wie das von mir gebastelte Achteck. Stellen sie sich vor, das Achteck wäre der Querschnitt durch ein Ommatidium. Die acht Sehzellen haben die Sehpigmente für blau, grün und UV (rot können Bienen nicht sehen, auf das Farbsehen kommen wir weiter unten) und in dem Fall auf dem Foto gibt es nur für den Bereich UV eine maximale Durchlässigkeit, dann sehen die Bienen mit diesem einen Ommatidium nur UV-Licht in voller Durchlässigkeit.



Das alleine reicht aber nicht aus, um ein komplexes Muster am Himmel zu erkennen.

Von den etwa 5600 Ommatidien jedes Facettenauges gehören immerhin etwa 140 Ommatidien zur POL-Region, mit diesen im Achteck zueinander stehenden Richtungen der Mikrovilli, die als Analytoren eingesetzt werden können um die Polarisation sehen zu können. Diese Ommatidien stehen aber nicht alle exakt wie Zinnsoldaten in einer Reihe. Sie stehen vielmehr in einem Muster zueinander, das dem Polarisationsmuster des Himmels entspricht.

Rüdiger Wehner von der Universität Zürich fand aufgrund von Verhaltensversuchen heraus, dass bei Bienen, aber auch bei Ameisen mit ihren Facettenaugen, die Vorzugsrichtungen aller Ommatidien der POL-Region ein Muster bilden, das in groben Zügen das Polarisationsmuster am Himmelszelt widerspiegelt. Wenn sich die Bienen drehen bis ihr augeninternes Muster sich mit dem Himmelsmuster deckt, wissen sie die Sonne im Rücken.

Da das Polarisationsmuster des Himmels mit der Sonne von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang am Himmel wandert, muss die Biene ein Wissen über diesen Sonnenverlauf haben und dafür ein sehr leistungsfähiges Gehirn besitzen. So kann sie berechnen, wo zu jeder Tageszeit Nord, Süd, West oder Ost ist. Sie nutzt dies, um den Weg zur ergiebigen Blumenwiese oder zurück zum Bienenstock zu finden.

Fazit

Die räumliche Anordnung der Ommatidien der POL-Region der Facettenaugen einer Biene entspricht in etwa der räumlichen Anordnung des polarisierten Himmelslichtes am Himmel. Bringt die Biene beides durch Drehen ihres Körpers in Deckung zueinander, weiß sie aufgrund ihrer Erfahrung, wo die Sonne steht, selbst wenn die Sonne nicht zu sehen ist.

Sie kann so z.B. ihre Futterquellen wiederfinden und diese Informationen mittels ihrer Sprache (Schwänzeltanz) anderen Bienen mitteilen. Schon Karl von Frisch (1886-1982) stellte in Versuchen fest, dass Bienen, die den ganzen Tag lang den gleichen Futterplatz anfliegen, vormittags in eine andere Richtung tanzten als nachmittags. Karl von Frisch folgerte schon damals daraus, dass die Sonne als Orientierungshilfe genutzt wurde, um anderen Bienen den Futterplatz mitzuteilen.

Robotiker in Frankreich haben mittlerweile sechsbeinige Roboter so mit Sensoren ausgestattet, dass sie die Polarisierung wahrnehmen und ihre Ziele selbstständig finden können.

Farbensehen, Formen erkennen

Das Farbrezeptorsystem im Bienenauge ist gegenüber dem des Menschen verschoben. Beim Menschen liegen die drei Empfindlichkeitsmaxima bei 440 Nanometer (nm) (blau), 530 nm (grün) und 570 nm (gelb). Bei Bienen liegen sie bei 350 nm (UV), 450 nm (blau) und 530 nm (grün).

Durch additive Farbmischung aller drei Grundfarbbereiche des Menschen entsteht der Farbeindruck weiß; bei der Biene ergibt sich der Farbeindruck weiß durch Mischung von Grün, blau und UV, anders als beim Menschen, der UV nicht sehen kann. Dieses Weiß wird daher Bienenweiß genannt. Außer Bienenweiß unterscheidet man vor allem folgende Bienenfarben:

Bienengrau ist der Farbeindruck für die Bienen, was Menschen als grün oder grüngelb sehen, z.B. Blätter.

Bienenpurpur ist der Farbeindruck für die Bienen, was für die Menschen z.B. gelb, orange oder gelbgrün erscheinende Blüten sind.

Bienenblau I ist der Farbeindruck der bei Bienen und Menschen gleich ist. Bienenblau II ist eine Mischung aus blau und UV für die Bienen.

Bienenschwarz ist der Farbeindruck für Bienen bei für den Menschen rein rote Objekte, z.B. Blüten.



Foto 15 zeigt das Farbspektrum des menschlichen Sehvermögens mit Hilfe eines Farbspektrometers

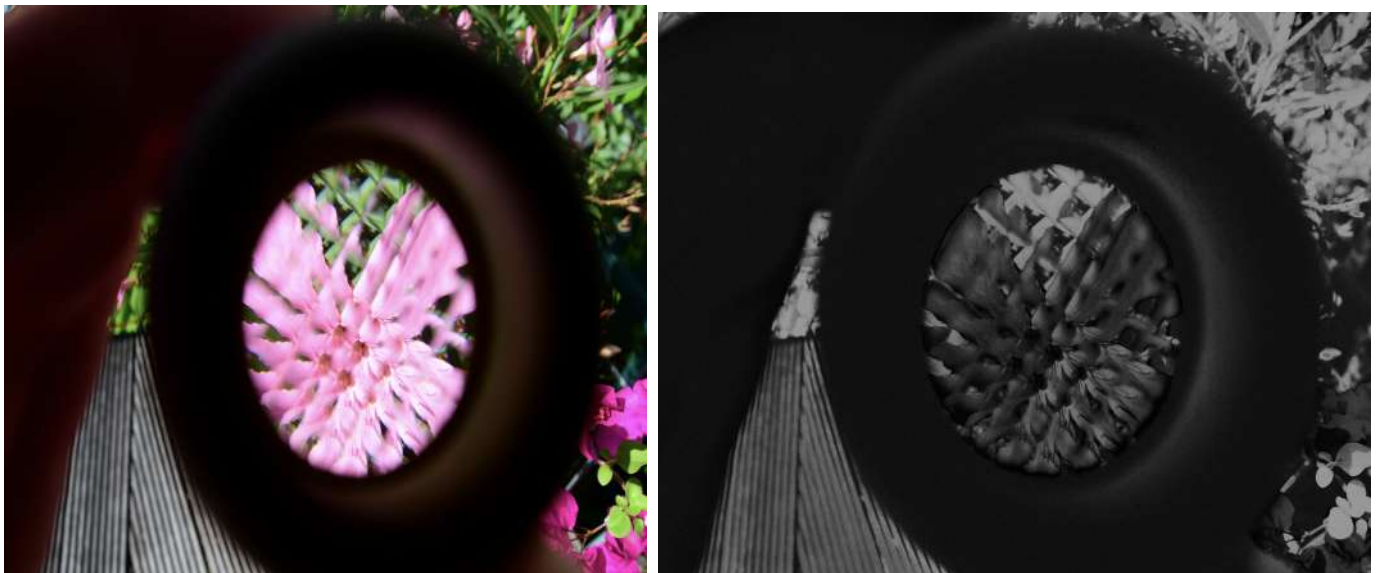


Foto 16 und 17 zeigen Oleanderblüten, wie wir sie durch ein Facettenauge sehen und wie Bienen sie sehen. Das Grün der Blätter oben rechts im Foto erscheint für Bienen hellgrau.

Rote Blumen werden angefliegen, wenn sie UV-reflektierende Saftmerkmale besitzen. Diese Markierungen wirken aus Sicht der Biene wie Leuchtsignale auf dunklem Untergrund.

Bienen können bis zu 30 km/h schnell fliegen. Farben können Bienen nur bei einer Fluggeschwindigkeit von maximal 5 km/h wahrnehmen. Bei höheren Geschwindigkeiten wird nur noch der Grünrezeptor im Auge der Biene angesprochen. Die Umgebung erscheint Bienen daher so, wie wenn wir Menschen Schwarz-Weiß-Bilder betrachten.

Erklärungsversuch: Das Gehirn der Biene soll bei schnellem Flug entlastet werden, sodass es sich auf wichtigere Dinge, wie das Erkennen von Hindernissen, konzentrieren kann.

Wie kann man sich das vorstellen?

Wir Menschen sehen Farben nur in vollem Licht. Bei Dämmerung und in der Dunkelheit verschwinden sie in unserer Wahrnehmung („Nachts sind alle Katzen grau“). Bei Bienen ist das auch tagsüber zutreffend, wenn sie schneller als 5 km/h fliegen.

Wie stellte man fest, welche Farben Bienen sehen können?

Bei Versuchen wurden Bienen mit Zuckerwasser während jeweils zwei Tagen auf verschiedene Farben dressiert, indem man die Petrischale mit Zuckerwasser mal auf die eine mal auf die andere Farbe stellte und alternativ eine Farbe präsentierte, bei der nur Wasser angeboten wurde. Der Ort der Farben wurde immer wieder verändert, so dass z.B. blau mit Zuckerwasser nicht immer an der gleichen Stelle stand. Außerdem wurden immer alle Duftmarkierungen durch die Bienen penibel eliminiert. Für die Dressurtests wurde das Zuckerwasser entfernt und jeweils nur Schälchen mit Wasser angeboten. Danach wurden eine Minute lang alle Bienen gezählt, welche auf den Schälchen über den Farbplatten Platz nahmen. Fast alle Bienen hatten sich für die dressierte Farbe entschieden, sofern die Farbe innerhalb ihres Sehspektrums lag. Gelb konnte von Bienen problemlos von blau unterschieden werden (99,7%). Rot konnten sie jedoch nur schwer von Orange unterscheiden. Dann wurden Versuche mit Graustufen durchgeführt, deren Helligkeitswerte denen der Farben ähnelten. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Bienen Farben nicht am Helligkeitswert sondern an ihrer Farbqualität unterscheiden können.

Ebenso konnten Bienen einfache Formen wie Kreise von Ovalen unterscheiden.

Unterschiedliche Blütenformen erleichtern den Bienen sie zu erkennen. Bei Versuchen mit Blütenattrappen zeigte sich, dass strukturreiche Muster, zum Beispiel kleine Kreise oder zwölfstrahlige Sterne bzw. viele eingeschnittenen Formen Bienen stärker anziehen als große Kreise oder sechseckige Sterne.

Das Wissen über die Unterscheidung von Farben machen sich Imker zunutze, wenn sie Bienen an eine neue Umgebung gewöhnen. Foto 18 zeigt blaue Symbole an Beuten (hier: Bienenkästen mit neuen Königinnen).



Ocellen



Die drei im Dreieck angeordneten Ocellen, hier bei gerade schlüpfenden Drohnen, sind Linsenaugen (Foto 19).

Hinter jeder Ocelle liegen bis zu 800 Sehzellen. Bienen können mit diesen Ocellen vermutlich die Lichtintensität messen und aufgrund ihrer Platzierung auf der Stirn die Tageslänge und Tageszeit durch Veränderung der Helligkeit registrieren. Die Ocellen sind mit dem Gleichgewichtsorgan verbunden und dienen daher vermutlich auch dazu, die Lage des Horizontes zu ermitteln und so eine stabile Fluglage zu halten.

Am Royal Melbourne Institute of Technology konnte festgestellt werden, dass sich in den Ocellen der Bienen auch Farbrezeptoren befinden. Es lag somit der Verdacht nahe, dass sie dem Sehzentrum im Gehirn der Bienen Informationen über die Lichtfarbe der Umgebung liefern.

Um dies nachzuweisen, blickten die Forscher ins Gehirn der Bienen und untersuchten mit Verfahren der Neurowissenschaften, mit welcher Hirnregion die Nerven der Ocellen verdrahtet sind. So konnte nachgewiesen werden, dass die Nerven der Ocellen tatsächlich die bekannten Farb-Verarbeitungsbereiche des Bienenhirns mit Informationen versorgen.



Fotos 20 und 21: Ocellen

