

Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen¹

Von K. v. FRISCH, Graz

Redaktionelle Vorbemerkung: *Der nachfolgende Beitrag ist ausnahmsweise kein Übersichtsreferat im üblichen Sinn, sondern eine ausführliche Originalmitteilung. Wir freuen uns indessen, sie als eine Fortsetzung der früher (Exper. 2, 397, 1946) an dieser Stelle erschienenen Arbeit Die Sprache der Bienen und ihre Nutzanwendung in der Landwirtschaft zu veröffentlichen. Die Frage einer spezifischen Wirkung polarisierten Lichts auf Organismen ist von allgemeinem und größtem Interesse.*

Bienen, die eine lohnende Futterquelle ausbeuten, alarmieren ihre Stockgenossen durch Tänze auf den Waben. Der Tanz bedeutet eine Aufforderung an die Kameraden, auszufliegen und sich an der Sammeltätigkeit zu beteiligen. Zugleich vermittelt er ihnen die Kenntnis der Blumensorte, nach der sie suchen sollen, und zwar durch den spezifischen Duft der beflogenen Blüten, der dem Körper der Tänzerin und dem eingetragenen Nektar anhaftet. Liegt das Ziel in der nächsten Umgebung des Heimatstocks, so wird es durch *Rundtänze* bekanntgegeben. Die verständigten Bienen suchen daraufhin die Nachbarschaft nach allen Seiten ab. Liegt die Futterstelle 100 m oder weiter entfernt, so finden *Schwänzeltänze* statt (Abb. 1). Ihr Tempo gibt

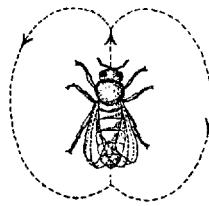


Abb. 1. Der *Schwänzeltanz*. Richtungsweisend ist der geradlinige Schwänzellauf zwischen den abwechselnden Runden nach links und nach rechts.

die Entfernung des Ziels vom Stock an, und der geradlinige Schwänzellauf die Richtung, in der es zu finden ist². Nur von dieser *Richtungsweisung* soll im folgenden die Rede sein.

Die tanzende Biene benutzt zur Übermittlung der Richtung die Sonne als Bezugspunkt. Die Bienen auf der Wabe erfahren, welchen Winkel zum derzeitigen Sonnenstand sie einhalten müssen, um bei ihrem Flug ans Ziel zu kommen. Der Tanz spielt sich aber unter

normalen Umständen im geschlossenen Stock ab, die Sonne ist nicht zu sehen. Die Wabe hängt lotrecht. Da bedient sich die Tänzerin eines sehr wunderbaren Umweges bei der Mitteilung, die sie zu machen hat: sie transponiert den Winkel zur Richtung des Sonnenstandes auf die Richtung der Schwerkraft. Nach welchem Schlüssel dies geschieht, ist aus Abb. 2 ersichtlich, die hier zum besseren Verständnis nochmals wiedergegeben sei¹.

Kippt man den Beobachtungsstock um, so daß die Wabenflächen *horizontal* liegen, so lassen sich die Bienen dadurch nicht aus der Fassung bringen. Es wird weiter getanzt. Aber auf der horizontalen Fläche *weist der geradlinige Schwänzellauf unmittelbar die Richtung zum Futterplatz*. Die Erklärung dieses Verhaltens würde keine Schwierigkeit bieten, wenn die Sonne für die tanzende Biene sichtbar wäre. Sie müßte dann nur beim Schwänzellauf denselben Winkel zur Sonne einhalten wie beim vorangegangenen Flug zum Futterplatz, um dessen Lage zutreffend anzugeben (Abb. 3). Da aber bei meinen Beobachtungen die Wabe beschattet war, liegt ein Problem vor; und dieses bildet den Gegenstand unseres Aufsatzes.

Es läßt sich auf mehrfache Weise zeigen, daß für die Orientierung der Tänze auf horizontaler Fläche das *Licht* von ausschlaggebender Bedeutung ist.

1. Einige gezeichnete Bienen wurden etwa 200 m westlich vom Stock gefüttert. Vom horizontal liegenden Beobachtungsstock war der hölzerne Schutzdeckel entfernt, so daß die Wabenfläche mit unseren Tänzerinnen durch das Glasfenster belichtet war. Zahlreiche Neulinge schwärmt aus und suchten in westlicher Richtung. An Beobachtungsplätzen, die wir nach anderen Himmelsrichtungen angelegt hatten, kamen fast keine Bienen. War aber bei einem solchen Versuch der Holzdeckel geschlossen, so daß die Wabe in Dunkelheit lag, so suchten die Neulinge nach allen Seiten. Daraus kann man schließen, daß im Dunkeln die horizontalen Tänze ungerichtet sind.

2. Man kann sich davon unmittelbar überzeugen, wenn man um den Stock eine Art Kartenhaus baut, ein Zelt aus lichtundurchlässigen Platten², und nun in

¹ Vorgetragen am 11. September 1948 in der Zürcher Zoologischen Gesellschaft.

² K. v. FRISCH, Exper. 2, 397 (1946); Österr. Zool. Z. 1, 1 (1946); Die Naturwissenschaften 35. Jg., H. 1 und 2 (1948); *Aus dem Leben der Bienen* (4. Aufl., Springer-Verlag, Wien 1948).

1 K. v. FRISCH, Exper. 2, 397 (1946).

2 Ich benützte «Dämmplatten» aus gepreßten Holzfasern, wie sie bautechnisch zur Wärmeisolierung verwendet werden.

dieser improvisierten Dunkelkammer bei schwachem, diffusem Licht oder beim Schein einer roten Dunkelkammerlampe beobachtet. Die Bienen sind für rotes Licht unempfindlich. Sie tanzen auch unter diesen Umständen, aber die Richtung des Schwänzellaufes wechselt fortwährend in regellosem Weise und läßt keine Beziehung zu der Richtung erkennen, in welcher der Futterplatz liegt. Die Tänze sind *desorientiert*. Dagegen ist die Richtungsweisung im Dunkeln *nicht gestört*, wenn die Wabenfläche – wie es der normalen Lage entspricht – *vertikal* steht. Für die Ausrichtung der Tänze ist ja dann die Schwerkraft maßgebend.

Unter natürlichen Bedingungen fehlt im Inneren des Stockes für horizontale Tänze die Voraussetzung: ein horizontaler Tanzboden. Dagegen beobachtet man nicht selten tanzende Bienen auf den horizontalen Anflugbrettchen vor dem Flugloch, also unter freiem Himmel. Es steht somit in Einklang mit den gegebenen Bedingungen und ist kein Schaden für die Verständigung im Bienenvolk, daß Tänze auf horizontaler Fläche nur im Tageslicht ihre Aufgabe richtig erfüllen können.

3. Wenn man im Dunkelzelt die desorientierten Tänzerinnen aus der Richtung, in der zur Zeit die Sonne steht, mit einer künstlichen Lichtquelle beleuchtet (Abb. 4 a), so kommt sofort Ordnung in ihr Benehmen und ihr Schwänzellauf weist dorthin, wo sich der Futterplatz wirklich befindet. Durch Änderung der Lampenstellung kann man sie aber nach jeder beliebigen Richtung tanzen lassen. Sie halten bei ihrem Schwänzellauf stets *zur Lichtquelle* denselben Winkel ein, den sie draußen bei ihrem Flug an den Futterplatz *zur Sonne* einzuhalten haben (Abb. 4 b).

Nach diesen Beobachtungen möchte man annehmen, daß sich die Biene beim horizontalen Tanz nach dem Stand der Sonne orientiert, obwohl sie sie nicht unmittelbar wahrnehmen kann. Es lag die Vermutung nahe, daß dies so sein könnte, weil auch unter dem

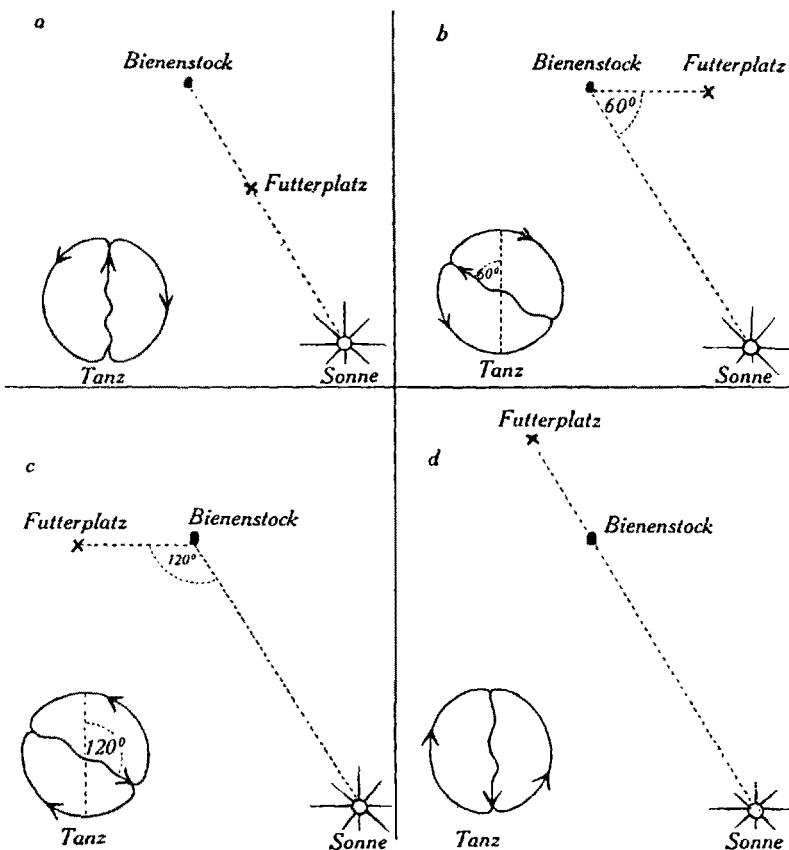


Abb. 2. Vier Beispiele für die *Richtungsweisung*. Die Sonne steht südöstlich vom Stock. Die Skizze links unten in jeder Abbildung zeigt schematisch den Tanz für die betreffende Lage des Futterplatzes: Schwänzellauf nach oben = Futterplatz in der Richtung *zur Sonne*; Schwänzellauf 60° nach links von der Richtung nach oben = Futterplatz 60° links von der Richtung *zur Sonne* usw.

schattenspendenden Dach des Beobachtungsstandes die größte Helligkeit von der Sonnenseite her auf die Wabe fällt. Um die Richtigkeit der Vermutung zu prüfen, stellte ich das Dunkelzelt auf und entfernte dessen nördliche Wand. Die Sonne stand im Süden. Die größte Helligkeit fiel nun zweifellos aus nördlicher Richtung auf die Wabe. Man sollte erwarten, daß die Bienen die Richtung nun verkehrt weisen würden, so

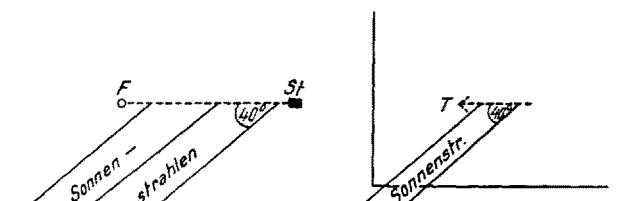
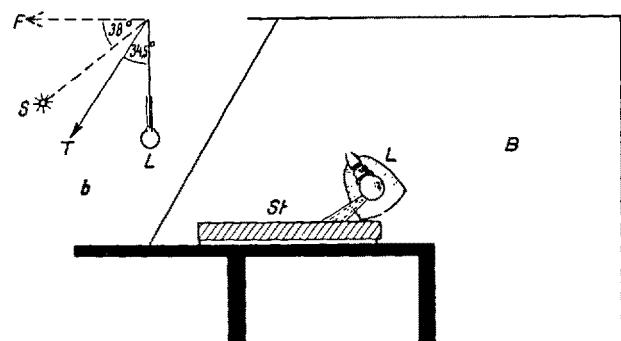


Abb. 3. Linkes Bild: Die Richtung vom Stock zum Futterplatz liegt 40° nach rechts von der Himmelsrichtung, in der die Sonne steht. Rechtes Bild: Wenn die Biene beim Tanz auf horizontaler Fläche im geradlinigen Schwänzellauf denselben Winkel zur Sonne einhält wie beim Flug zum Futterplatz, weist sie direkt nach dem Futterplatz.

Abb. 4. a) Der horizontal gelegte Beobachtungsstock (St) im lichtdichten Zelt (Querschnitt). L Lampe, B Raum für den Beobachter. b) Beispiel für ein Versuchsergebnis. S Sonne, F Richtung zum Futterplatz, L Lampenstellung, T Tanzrichtung im Versuch, St Tanzrichtung der Bienen (Durchschnitt aus 10 beobachteten Tänzen). (Für weitere Protokollbelege vgl. Seite 144, Note 1.)

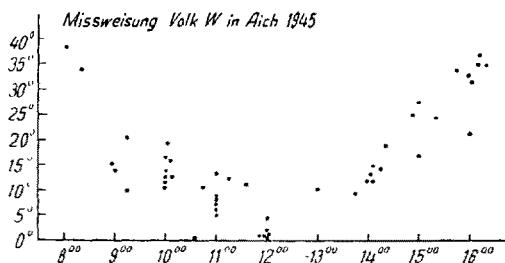


Abb. 5. Die «Mißweisung» bei einem Beobachtungsvolk in 50 Versuchen, 24. 8. bis 23. 9. 1945. Das Flugloch war nach Osten gerichtet. Auf der Abszisse: die Zeit der Beobachtung. Auf der Ordinate: die Differenz (in Winkelgraden) zwischen der von den Bienen angezeigten Richtung (nach dem Schlüssel Abb. 2) und der wahren Richtung zum Futterplatz (aus v. FRISCH, 1948).

wie sie im Lampenversuch verkehrt tanzen, wenn draußen die Sonne im Süden steht, aber im geschlossenen Zelt die Lampe aus Norden scheint. Statt dessen tanzten sie *richtig*. Dasselbe war der Fall, wenn statt der Nordwand eine andere Seitenwand des Zeltes entfernt wurde. Es kam also nicht darauf an, von welcher Seite das meiste Licht einfiel. Nur im geschlossenen Zelt orientierten sie sich nach dem Lichteinfall. Sobald sie nach irgendeiner Seite freien Ausblick nach dem Himmel hatten, zeigten sie die wahre Richtung nach dem Futterplatz an; sie schienen den Stand der Sonne zu erkennen und sich danach zu orientieren. Es genügte noch, wenn für sie in dem allseits geschlossenen Zelt durch ein schräg eingesetztes Rohr durch die Nordwand ein kreisrundes Stück blauen Himmels mit einem Durchmesser von etwa 10 Winkelgraden sichtbar war. Wurde vor dem Ofenrohr ein Spiegel angebracht, so daß von der Wabe aus statt eines nördlichen Himmelsteiles das Spiegelbild eines südlichen Himmelsausschnittes zu sehen war, so tanzten die Bienen verkehrt und wiesen nach Osten statt nach Westen, wo sich ihr Futterplatz befand. Ich habe daraus geschlossen, «daß die Bienen an dem Ausschnitt blauen Himmels eine nach der Sonne ausgerichtete Erscheinung wahrnehmen, nach der sie sich zum Sonnenstand orientieren können»¹.

Diese Behauptung klingt unwahrscheinlich. Sie wurde aber auf unerwartete Weise durch ganz andere Beobachtungen bestätigt. Bei den Tänzen auf vertikaler Wabenfläche, also bei normaler Stellung des Bienenstocks, weicht die Richtungsweisung der Bienen, wenn man den in Abb. 2 gegebenen Schlüssel zugrunde legt, oft um einen beträchtlichen Winkel von der wahren Richtung zum Futterplatz ab. Diese «Mißweisung» war nicht auf Ungenauigkeiten der Bienen oder des Beobachters zurückzuführen. Denn in einem gegebenen Versuch war die Abweichung, mit geringfügigen Unterschieden, bei allen Bienen dieselbe. Und es war ein System in diesen Fehlern. So lag in einer Versuchsreihe an einem bestimmten Volk (24. 8. bis

23. 9. 1945) die Mißweisung stets in demselben Sinne und war morgens und gegen Abend am größten, während sie um 12 Uhr fast auf 0 zurückging (Abb. 5). Der tägliche Gang der Mißweisung zeigte aber je nach der Aufstellung der Völker Bilder von verwirrender Verschiedenheit. Bei der Bearbeitung des gesamten Materials aus 3 Jahren mit mehr als 3600 protokollierten Tänzen ergab sich für diese Mißweisung und alle ihre zunächst so unverständlichen Varianten eine einheitliche Erklärung, die nur zur Voraussetzung hat, daß die Biene wirklich an einem Stück blauen Himmels den Sonnenstand ablesen kann. Die Deutung lautet:

Im dunklen Stock auf vertikaler Wabenfläche transponiert die tanzende Biene die Richtung zur Sonne auf die Richtung zur Schwerkraft (Abb. 2). Zur Beobachtung wird aber der Schutzdeckel entfernt, ein Teil des Himmels wird für die Bienen sichtbar und sie erkennen daran den Sonnenstand. Unter diesen Umständen suchen sie sich beim Tanz nicht mehr allein nach der Schwerkraft, sondern zugleich direkt nach der Sonne einzustellen. Je nach der Himmelsrichtung, die von der Wabe aus sichtbar ist, nach der Stellung der Biene und dem Stand der Sonne muß die letztere in verschiedenem Sinne und in verschiedenem Ausmaß mit der Schwerkraft in Konkurrenz treten. Die Analyse aller Einzelbeobachtungen hat ergeben, daß tatsächlich die «Fehler» der Richtungsweisung, mit ihrem spezifischen Gang je nach der Stellung des Stockes, in jedem Falle einen Kompromiß zwischen den beiden Richtungen darstellen, welche die Bienen beim Transponieren auf die Richtung der Schwerkraft oder bei unmittelbarer Orientierung nach dem Sonnenstand hätten eingehalten müssen. Es würde zu viel Raum erfordern, dies hier im einzelnen auseinanderzusetzen und zu belegen. Es genüge der Hinweis auf den folgenden, im Sommer 1948 durchgeführten Kontrollversuch:

Ein Beobachtungsstock war mit dem Flugloch nach Westen aufgestellt, die Tanzfläche der Wabe war nach Süden gerichtet. Die Bienen hatten Ausblick auf blauen Himmel. In 17 Beobachtungsreihen vom 1. bis 16. August ergab sich für die Mißweisungen ein Punktfeld (Abb. 6), das mit dem täglichen Gang der Fehler in Abb. 5 (Versuchsreihe 1945) im wesentlichen über-

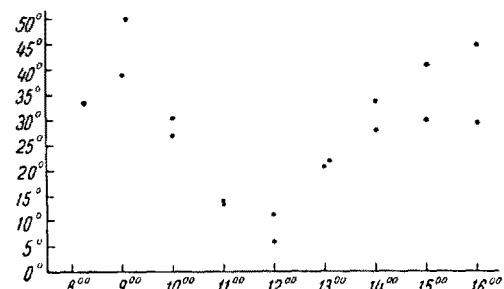


Abb. 6. Die «Mißweisung» bei einem Beobachtungsvolk in 17 Versuchen, 1. bis 16. 8. 1948. Flugloch nach Westen gerichtet. Weitere Erklärung wie bei Abb. 5.

¹ K. v. FRISCH, Naturwissenschaften 35. Jahrg., H. 1 und 2 (1948).

einstimmt. Die Abweichung zwischen der gewiesenen Richtung und der wahren Richtung zum Futterplatz erreicht hier in den Morgen- und Abendstunden Werte bis zu 50° . In 27 Beobachtungsreihen an dem gleichen Volk, die zwischen 3. und 30. August im geschlossenen Zelt bei schwachem, diffusen, weißem Licht (Punkte in Abb. 7) oder bei rotem Licht (Kreuzchen in Abb. 7)

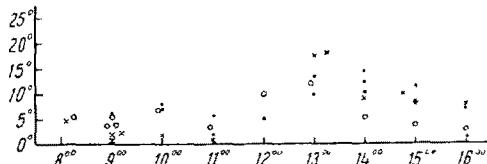


Abb. 7. Dasselbe Volk wie bei Abb. 6. Differenz zwischen der von den Bienen angezeigten Richtung und der wahren Richtung zum Futterplatz:

Punkte: in 15 Versuchen im geschlossenen Zelt bei schwachem, diffusen, weißem Licht, 3. bis 30. 8. 1948.
 Kreuzchen: in 12 Versuchen im geschlossenen Zelt beim roten Licht einer Dunkelkammerlampe, 3. bis 30. 8. 1948.
 Ringe: in 11 Versuchen bei freier Sicht der Bienen auf bedeckten Himmel am 4., 9. und 10. 8. 1948.

durchgeführt wurden, sind die großen «Fehler» in den frühen und späten Stunden völlig verschwunden¹, die Abweichungen halten sich in engen Grenzen. Die Erwartung, daß die großen Mißweisungen und ihr typischer Gang verschwinden müßten, wenn man den Bienen den Ausblick nach dem Himmel nähme, hat sich somit erfüllt. Wir müssen uns damit abfinden, daß die Biene an einem kleinen Teil des Himmels erkennen kann, wo die Sonne steht, auch ohne diese unmittelbar zu sehen, und fragen jetzt, wie das möglich ist.

Einen Hinweis geben folgende Beobachtungen: die Tänze auf horizontaler Fläche im geschlossenen Zelt waren richtig orientiert, wenn die Bienen durch ein eingesetztes Rohr ein Stück Himmel sehen konnten – aber nur, wenn dieser Himmelsausschnitt wenigstens teilweise blau war. Es entspricht dieser Tatsache und steht mit der eben entwickelten Vorstellung vom Zustandekommen der Mißweisung bei vertikaler Wabenstellung in Einklang, daß jene «Fehler» der Richtungsweisung beim Tanz auf der vertikalen Wabenfläche nur zu beobachten sind, wenn der den Bienen sichtbare Himmel wenigstens teilweise blau ist. Elf Beobachtungsreihen der Abb. 7 (die durch Ringe angegebenen Werte) wurden am 4., 9. und 10. August bei freier Sicht auf völlig bedeckten Himmel gewonnen. Die Abweichungen entsprechen ganz den Fehlergrößen im geschlossenen Zelt. Besonders eindrucksvoll war ein Versuch am 4. August $8^{50}-9^{10}$: die rasch ziehenden Wolken gaben kurz nach 9 Uhr in dem für die Bienen sichtbaren Himmelsbereich sehr schnell ein großes blaues Feld frei. Gleichzeitig änderte sich, grob augenfällig, die Tanzrichtung der Bienen im Sinne der üblichen Mißweisung. Der bedeckte Himmel stört die

¹ Für den kleinen Anstieg der Fehler gegen 13 Uhr weiß ich vorläufig keine begründete Deutung zu geben. Er scheint auch im Verlauf der Kurve Abb. 6 enthalten zu sein.

Richtungsweisung nach der Schwerkraft also nicht, nur der blaue Himmel lenkt die Bienen ab.

Der blaue Himmel weist nun tatsächlich in der teilweisen *Polarisation des Lichtes* eine nach der Sonne ausgerichtete Erscheinung auf, die durch Wolken in ihrer Intensität wesentlich herabgemindert wird. Ich habe deshalb schon in einer früheren Arbeit¹ die Vermutung ausgesprochen, daß die Bienen an der *Polarisation* des blauen Himmelslichtes den Sonnenstand erkennen².

Mit dieser Polarisation hat es folgende Bewandtnis: Bei unpolarisiertem Licht verlaufen die transversalen Schwingungen der Ätherteilchen nach allen Richtungen. Bei vollständig polarisiertem Licht liegen alle diese Schwingungen in einer bestimmten Ebene. Das blaue Himmelslicht ist *teilweise polarisiert* und zeigt in zweifacher Hinsicht eine Beziehung zum Sonnenstand: *Erstens* nimmt die Polarisation mit wachsendem Abstand von der Sonne zu, um bei einem Winkel von 90° ein Maximum zu erreichen und weiterhin, zum Gegenpunkt der Sonne hin, in gleichem Maße wieder abzunehmen. Das blaue Himmelslicht, das unter einem Winkel von 90° , also senkrecht zur Richtung der Sonnenstrahlen in unser Auge fällt, ist zu 60–70% polarisiert, enthält also immer noch 30–40% unpolarisiertes Licht. In einem beträchtlichen Umkreis um die Sonne und ihren Gegenpunkt ist das Licht nicht oder sehr schwach polarisiert. *Zweitens* steht die Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes jeder Himmelsstelle in einer gesetzmäßigen Beziehung zum Sonnenstand: denkt man sich durch das Auge des Beobachters, durch die Sonne und durch den anvisierten Punkt am Himmel eine Ebene gelegt, so schwingt das polarisierte Licht von jener Himmelsstelle senkrecht zu dieser Ebene³. Die Schwingungsrichtungen des polarisierten Lichtes im ganzen Himmelsbereich lassen sich also durch ein System von Kreisen um die Sonne und ihren Gegenpunkt anschaulich machen. Mit einem entsprechenden physikalischen Apparat ausgerüstet kann daher ein menschlicher Beobachter aus einem Stück blauen Himmels den Sonnenstand entnehmen, ja manche Leute, die für die entoptische Erscheinung der «Haidingerschen Büschel»⁴ besonders empfindlich sind, können es auch ohne Apparat. Die starr befestigten Facettenaugen am Kopf der Biene, die gleichzeitig nach allen Seiten blicken, könnten bei entsprechenden optischen Eigenschaften hervorragend geeignet sein, die Polarisation am Himmelsgewölbe zu analysieren.

¹ K. v. FRISCH, Die Naturwissenschaften 35. Jg., H. 1 und 2 (1948).

² Diesen Gedanken haben bei Diskussionen über meine Beobachtungen mehrere Physiker voneinander unabhängig geäußert, zuerst wohl Prof. O. KIEPENHEUER (Fraunhofer-Institut, Freiburg i. Br.). Ihm sowie Prof. H. BENNDORF (Graz) bin ich für wiederholte und eingehende Beratung in physikalischen Fragen herzlichen Dank schuldig.

³ In der Nähe der Sonne und ihres Gegenpunktes gibt es gewisse Abweichungen von dieser Regel.

⁴ Literatur s. z. B. bei G. BOEHM, Acta ophthalmol. 18, 109 (1940).

Es ist eine bestechende Vorstellung, daß die Biene mit ihren Tausenden von Einzelaugen, die wie Nicols wirken könnten, vielleicht ein nach der Sonne ausgerichtetes Muster abgestufter Helligkeiten über den Himmel geblendet sieht, und darin eine bisher ungeahnte Hilfe für ihre Orientierung findet. Aber unsere erste Frage muß sein, ob wir überhaupt auf der rechten Spur sind, und ob die Polarisation des Himmelslichtes hier wirklich eine Rolle spielt.

Dies sollte sich prüfen lassen, indem man die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes für die tanzende Biene verändert. Es fehlte nur zunächst für dieses Vorhaben ein geeigneter Behelf. Die bei uns erhältlichen «Polarisationsfolien», die – wie ein Nicolsches Prisma – das durchgehende Licht polarisieren, waren viel zu klein. Ich verdanke Prof. A. KROGH, der meine Absichten kannte, die entscheidende Hilfe. Er sandte mir von einer Reise nach USA. eine 15/30 cm große Polarisationsfolie, wie sie dort als Blendungsschutz beim Autofahren Verwendung finden (Polaroid Visor).

Diese Polarisationsfolie legte ich einfach auf die Glasscheibe des Stockes, über der horizontalen Wabe mit tanzenden Bienen. Beim ersten derartigen Versuch wiesen die Tänze auch unter der Folie angenähert richtig nach dem Futterplatz. Als ich aber nun die Folie wie eine Drehscheibe in andere Lage brachte, war die Wirkung verblüffend. Die Bienen änderten die Tanzrichtung im Sinne der Drehung der Folie, und wenn diese ein gewisses Maß erreicht hatte, tanzten sie desorientiert nach allen Richtungen.

Um übersehbare Verhältnisse zu schaffen, blendete ich in den weiteren Versuchen durch einen dreiteiligen Schirm das Himmelslicht von drei Seiten ab; über der Wabe befand sich das Dach des Beobachtungsstandes, so daß für die Bienen nur noch ein begrenzter Himmelsteil von etwa 50° Breiten- und 20° Höhenausdehnung, mit einer mittleren Höhe von etwa 40° über dem Horizont, nach einer der vier Himmelsrichtungen sichtbar blieb. In insgesamt 62 Versuchsreihen wurden bei verschiedener Folienstellung, wechselnder Himmelsrichtung und verschiedener Tageszeit die Tänze in der Weise protokolliert, daß in jedem Versuch meist bei 10 Bienen die Richtung des Schwänzellaufes an einem auf der Glasscheibe angebrachten Liniensystem abgelesen und daraus der Mittelwert genommen wurde. Dabei haben sich folgende Regeln ergeben:

Liegt die Polarisationsfolie so über der Wabe, daß die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes¹, das aus dem zentralen Teil des sichtbaren

Himmelsbereiches kommt, beim Durchgang durch die Folie keine wesentliche Änderung erfährt, so sind die Tänze angenähert richtig orientiert; wird die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes durch die Folie deutlich gedreht, so ändert sich die Tanzrichtung der Bienen im Sinne dieser Drehung; wird die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes durch die Folie um mehr als 50–60° gedreht, so sind die Tänze desorientiert. – Unstimmigkeiten ergaben sich bei den Versuchen mit Westhimmel am Nachmittag, mit Osthimmel am Vormittag und mit Südhimmel in den Mittagsstunden. Sie dürften mit der schwachen und teilweise abweichenden Polarisation der sonnennahen Himmelsteile zusammenhängen. Die genannten Regeln stützen sich auf folgenden Tatbestand:

Unter allen Versuchen – mit Ausschluß der eben erwähnten mit sonnennahen Himmelsteilen – sind 7, bei welchen die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes durch die Folie um nicht mehr als 10° gedreht wurde. In diesen 7 Versuchen betrug die Abweichung der Tanzrichtung von der wahren Richtung zum Futterplatz: 6°, 7°, 8°, 10°, 20°, 20° und 33°, im Durchschnitt 15°. Ein Beispiel ist in Abb. 8 dargestellt.

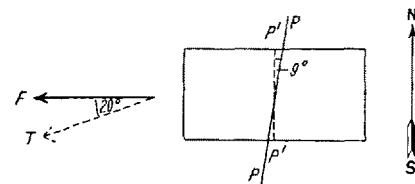


Abb. 8. Tänze unter der Polarisationsfolie, Versuch 234 vom 25. 8. 1948 9¹⁵–22. Die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes wird durch die Folie nicht wesentlich verändert, die Richtungsweisung ist angenähert richtig.

Rechtes Bild: Lage der Polarisationsfolie im Versuch. P–P' Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes, P'–P'' Schwingungsrichtung des Lichtes nach dem Durchgang durch die Folie.

Linkes Bild: F Richtung zum Futterplatz, T Tanzrichtung der Bienen.

In 11 Versuchen war die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes durch die Folie um mehr als 10°, aber weniger als 55° gedreht, 9mal im Sinne des Uhrzeigers, 2mal im entgegengesetzten Sinne. Die Tanzrichtung war stets im entsprechenden Sinne abweichend von der wahren Richtung zum Futterplatz. Wenn die Tänze der Bienen unter der Folie nach einer

sprechend dem Ort der Bienenwabe, miteinander verbunden sind. Die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes steht senkrecht auf der durch jene beiden Zeiger gelegten Ebene und wird im Modell durch einen entsprechend eingesetzten Drahtstab angezeigt. Mit Hilfe einer Lampe erhält man durch den Schatten des Stabes die auf die horizontale Wabenfläche projizierte Schwingungsebene und kann ihre Richtung ablesen. – Überdies wurde die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes wiederholt auch am Versuchsort mit Hilfe der Polarisationsfolie geprüft. Die Befunde stimmen im allgemeinen befriedigend mit den Ablesungen am Modell überein. Teilweise ergaben sich Differenzen, die noch zu klären sind.

¹ Die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes wurde nachträglich für jeden Versuch mit einem einfachen Apparat festgestellt, dessen Konstruktion und Herstellung ich Prof. H. BENNDORF und der Werkstatt des Grazer Physikalischen Instituts verdanke. Der Apparat gestattet an entsprechend angebrachten Teilkreisen das Azimut und die Höhe der Sonne sowie Azimut und Höhe der sichtbaren Himmelsteile für den betreffenden Versuch mit zwei Zeigern einzustellen, die im Zentrum des Apparates, ent-

bestimmten Richtung weisen, und man dreht nun die Folie um einen Winkel, der nicht so groß ist, daß die Bienen desorientiert tanzen, so ändert sich die Tanzrichtung im Sinne der durchgeführten Drehung und um angenähert den gleichen Winkel. Dies war auch bei den etwas abweichen Ergebnissen mit sonnennahen Himmelsbereichen zu beobachten. Die Tabelle bietet eine Übersicht über die 12 einschlägigen Doppelversuche.

Ver- such Nr.	Mittlere Beobach- tungs- zeit	Him- mels- bereich	Drehung d. Pol.-Folie zwischen beiden Ver- suchen um	Änderung der Tanz- richtung in gleichen Sinne um (Durchschn.- wert).	Zahl der beobachte- ten Tänze n
181 182	16. 8. 10 ⁰³ 10 ¹⁰	West	30°	27°	10 7
182 183	16. 8. 10 ¹⁰ 10 ¹⁸	West	30°	26°	7 7
186 187	16. 8. 13 ⁸⁷ 13 ⁴²	West	30°	32°	10 10
187 188	16. 8. 13 ⁴² 13 ⁵⁰	West	30°	30°	10 10
233 234	25. 8. 9 ¹⁰ 9 ¹⁸	West	45°	42°	10 10
297 298	31. 8. 14 ⁴² 14 ⁴⁷	West	30°	31°	2 4
328 329	22. 9. 13 ⁰⁰ 13 ⁰⁸	West	30°	39°	10 10
178 179	16. 8. 9 ²⁸ 9 ⁴²	Nord	30°	46°	7 6
179 180	16. 8. 9 ⁴² 9 ⁵⁴	Nord	60°	66°	6 6
192 193	16. 8. 14 ⁴⁷ 15 ⁰⁰	Nord	30°	51°	7 10
246 247	25. 8. 13 ²⁵ 13 ⁵⁰	Ost	30°	28°	10 10
320 322	22. 9. 10 ⁰⁶ 10 ³⁰	Ost	30°	57°	10 10

In allen 14 Versuchen, in welchen die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes durch die Folie um einen Betrag von 55° oder mehr gedreht war – und nur in diesen Versuchen – waren die Tänze desorientiert. Ein Beispiel ist in Abb. 9 dargestellt.

Läßt man bei gleicher Lage der Polarisationsfolie Licht aus verschiedenen Himmelsrichtungen auf die tanzenden Bienen fallen, so ändern sie ihre Tanzrichtung. Nach den schon besprochenen Regeln war dies zu erwarten, da sich die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes mit der Himmelsrichtung

ändert. Abb. 10 bringt als Beleg das Ergebnis zweier Versuche vom 16. August mit Nord- und Westlicht.

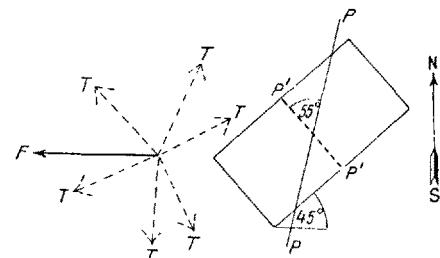


Abb. 9. Tänze unter der Polarisationsfolie, Versuch 235 vom 25. 8. 1948, 9²²⁻³⁰. Die Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes wird durch die Folie um 55° gedreht. Die Tänze sind desorientiert. Erklärung wie bei Abb. 8.

Die Tanzrichtung ist bei unveränderter Lage der Polarisationsfolie und bei gleicher Himmelsrichtung

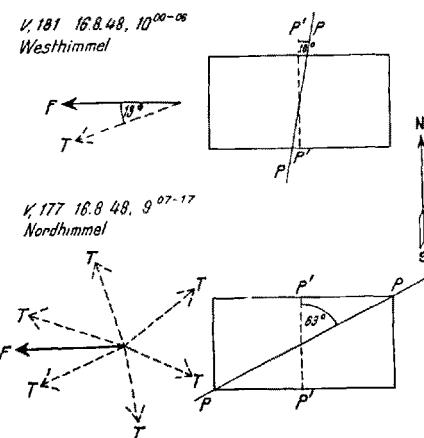


Abb. 10. Die Tänze unter der Polarisationsfolie sind um die gleiche Tageszeit und bei gleicher Lage der Folie verschieden bei Licht aus verschiedener Himmelsrichtung. Erklärung wie bei Abb. 8.

zu verschiedener Tageszeit verschieden. Das Beispiel Abb. 11 zeigt, wie auch dieser Befund mit der Ände-

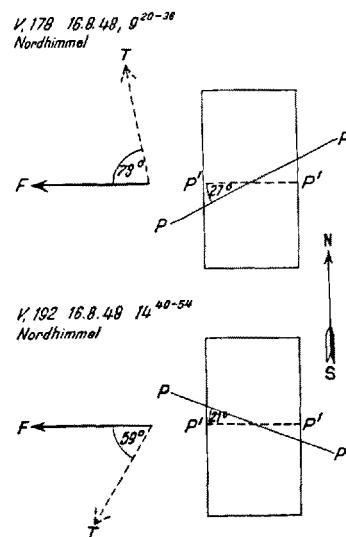


Abb. 11. Die Tänze unter der Polarisationsfolie sind bei Licht aus gleicher Himmelsrichtung und gleicher Lage der Folie verschieden zu verschiedener Tageszeit. Erklärung wie bei Abb. 8.

rung der Schwingungsrichtung des polarisierten Himmelslichtes in Beziehung steht, die sich aus dem geänderten Sonnenstand ergibt.

Es wäre verfrüht, diese Befunde eingehend zu besprechen oder quantitativ auszuwerten. Ich glaube, daß dies erst dann mit Aussicht auf Erfolg geschehen kann, wenn der den Bienen sichtbar gemachte Himmelsbereich mit geeigneten Hilfsmitteln bei jedem Versuch polarisationsoptisch geprüft wird. Doch scheint mir das eine aus den bisher vorliegenden Beobachtungen mit Sicherheit hervorzugehen: *daß die Polarisation des Himmelslichtes für die Orientierung der Bienen wirklich von Bedeutung ist.*

Wahrscheinlich nicht nur für die Bienen. Ich habe nachträglich bemerkt, daß offenbar die gleiche Erscheinung, die mir bei diesen so überraschend kam, schon 1923 von SANTSCHI¹ an Ameisen beobachtet worden ist. Er studierte, wie sie bei ihren Märschen in ödem, an optischen Marken armem Gelände die Sonne als Kompaß benützen und machte die Entdeckung, daß sie auch die richtige Marschroute einhalten können, wenn man ihnen durch einen zylindrischen Schirm den Blick nach der Sonne nimmt und nur der blaue Himmel über ihnen sichtbar bleibt. SANTSCHI sprach die Vermutung aus, daß sie am hellen Tag die Sterne sehen könnten und sich nach ihnen richten, wie des Nachts ein erfahrener Schiffer. Ich denke, ein Versuch mit der Polarisationsfolie an den navigierenden Ameisen wird dahinführen, daß SANTSCHIS Theorie durch eine andere – kaum weniger romantische – ersetzt werden muß.

¹ F. SANTSCHI, Mém. de la Soc. Vaudoise des Sci. nat. 1923, S. 187.

Summary

Bees that inform their hive companions of the existence of a copious source of food by means of the tail-wagging dance communicate to them the direction in which the food lies through a straight wagging walk. They utilize the sun as a point of reference and transpose the angle that has to be made while flying to the feeding-place with respect to the direction of the *sun* onto the direction of *gravity*. This applies to the dance on the normal, vertically hanging comb. On a horizontal surface they point *directly to the feeding-place* through the direction of their wagging walk. It is investigated here how this is possible.

The dances on a *horizontal* surface become disorientated in the dark. They are correctly orientated as soon as a piece of blue sky becomes visible to the dancing bees. This is comprehensible only if it is possible for the bees to recognize the position of the sun from a piece of blue sky.

The dances on a *vertical* surface of a comb are correctly orientated in the dark (according to gravity, cf. Fig. 2). When a piece of blue sky becomes visible to the bees, then follows a deviation in the direction of the dance in the sense of an immediate orientation toward the direction of the sun. Thence follows too that the position of the sun is recognizable for them from the blue sky.

The idea suggested itself strongly that this orientation concerning the sun's position is made possible by the *polarization* of the blue light of the sky. This supposition has been confirmed. One succeeds in influencing the direction of the bees' dance on a horizontal surface by means of a polarizing film. When the film is turned, i. e. when the direction of oscillation of the polarized light of the sky is altered, the direction of the dances is correspondingly changed.

It can be surmised that this method of orientation is of importance in other insects as well.

Kristallspektren

Von GEORG JOOS¹, München

1. Durch die Aufdeckung von zunächst rein formalen zahlenmäßigen Beziehungen in den Spektren der Atome, die ihren Ausgang von der Entdeckung der Wasserstoffformel durch den Basler Gymnasiallehrer BALMER nahm, hat man, als man mit Hilfe der Quantentheorie diese Beziehungen zu deuten gelernt hatte, ungeahnte Einblicke in den Bau der Elektronenhülle der Atome gewonnen. Diese Erkenntnisse wurden durch die ebenso erfolgreiche Erforschung des Baus einfacher Moleküle erweitert. Der nächste Schritt ist die Erforschung der Änderung der Elektronenhülle freier Atome oder Ionen beim Zusammentritt zum Kristallgitter. Wir sind dabei in der glücklichen Lage, daß wir den Leitfaden, die Atommechanik nun fertig

zur Verfügung haben und sie nur für unsern speziellen Zweck ausarbeiten müssen. Die Grundprinzipien, auf denen wir aufbauen müssen, sind:

a) Jedes atomare System (Atom, Ion, Molekül) hat eine Anzahl ausgezeichneter Energiestufen, in denen es allein existenzfähig ist. Für Einelektronensysteme (Wasserstoff, ionisiertes Helium usf.) lassen sich diese Stufen einfach berechnen, für kompliziertere Atome ist die Genauigkeit der Berechnung heute nur noch eine Frage der aufzuwendenden (allerdings immensen) Rechenarbeit, man wird daher im allgemeinen durch eine formale Analyse der Spektren diese Energiestufen empirisch ermitteln.

b) Beim Übergang von einer Energiestufe zur anderen wird Licht nach dem Grundgesetz emittiert oder

¹ Technische Hochschule München, Verf. z. Z. in USA.