BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1983

MÜNCHEN 1984

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

‚Zeitsinn' und Aktivitätsrhythmus der Honigbiene – endogen oder exogen gesteuert?

Von **Hermann Martin, Martin Lindauer** und **Ulla Martin**

Zoologisches Institut II, Universität Würzburg, Röntgenring 10, 8700 Würzburg.

Vorgelegt von Hansjochem Autrum in der Sitzung vom 7. Mai 1982

„Zeitsinn" und Aktivitätsrhythmik der Honigbiene sind exogen gesteuert.

1. Auf eine bestimmte Tageszeit dressierte Bienen orientieren sich nach dem horizontalen Radiusvektor der täglichen Variation des erdmagnetischen Feldes (EMF), dem sog. „magnetischen Azimut". Dies wurde gezeigt durch Zeitdressuren am gleichen geographischen Ort („stationäre" Versuche), an Versetzungsversuchen in der geographischen Länge und durch Transplantation von Gehirngewebe zeittrainierter Spender auf naive Wirte.

2. Es wurden zwei Typen der freilaufenden (free running) Periodik nachgewiesen. Sie beruhen auf unterschiedlichen Mechanismen. Diese Präferenzaktivitäten werden gesteuert:

a) durch den räumlichen Hodographen des täglichen Variationsfeldes des EMF.

Aus den Parametern des Variationsfeldes läßt sich eine „Intensitätskurve" über den Tag (Stundenintervalle) nach folgender Formel berechnen:

$$1 + \sin \alpha + \sin \Delta\beta,$$

wenn die magnetische Höhe h_m negativ ist und

$$1 + \sin \alpha - \sin \Delta\beta,$$

wenn die magnetische Höhe positiv ist, wobei $\alpha \triangleq \alpha\,[h_m]$ (= Höhe des magnetischen Feldes), $\Delta\beta \triangleq \Delta\beta\,[Az_m]$ (= magnetische Azimutwinkelgeschwindigkeit in Stundenintervallen) ist. Die magnetische

Höhe geht als Absolutwert, der magnetische Azimut als Azimutwinkelgeschwindigkeit ($\Delta\beta$) der jeweiligen Tagesstunde in die Berechnung ein. Da der Azimutwinkelgeschwindigkeit ($\Delta\beta$) je nach Raumlage der magnetischen Höhe – unter oder über dem Horizont – eine positive bzw. negative Bewertung zukommt, liegt die Vermutung nahe, daß der „Intensitätskurve" ein Kreiselmechanismus zugrunde liegt. Diesen Formeln folgt die Präferenzaktivität der Bienen. Wichtig ist, daß die Zeit in beiden Fällen (unter 1. und 2.a) als eine *Variable* und keine *Konstante* in Erscheinung tritt, wenn sie aus den Aktivitätsmustern der Bienen abgelesen wird.

b) Ist das natürliche EMF gestört oder wird es künstlich gestört, oder werden auf eine bestimmte Zeit dressierte Bienen in der geographischen Breite versetzt, so ist die Orientierung in der Zeit gestört. In diesen Fällen werden unter andererseits konstanten Bedingungen (Temperatur, Lichtintensität) periodisch schwingende Kurven gemessen. Solche Kurven werden auch beobachtet, wenn im künstlich gestörten EMF Präferenzaktivitäten gemessen werden. Dies ist der zweite Typ eines freilaufenden (free running) Rhythmus. Er wird allein durch die astronomische Konstellation von Sonne und Mond in Bezug zum Versuchsort gesteuert. Es ist aber nicht das Gezeitenpotential von Ebbe und Flut, sondern es sind *vorgegebene Ereignisse* aus dem *Raum-Zeit-Kontinuum,* das dadurch entsteht, daß „Sonnenraum" und „Mondraum" in *ein* System transformiert und verknüpft mit *konstanter Zeit* (in Sonnentag- bzw. Mondtagperiodik) eine vierdimensionale Einheit ergeben. Diese einfache Theorie ist in der Formel

$$\text{Aktivität der Bienen} / \Delta t$$
$$= [0{,}46 \times (\cos^2 h\odot + \sin Az\odot) + (\cos^2 h\,☾ + \sin Az\,☾)] / \Delta t$$

ausgedrückt, wobei 0,46 die Gezeitenkonstante, $\odot$ die Sonne, ☾ den Mond, h die Höhe, Az den Azimut und Δt die Zeit im Stundenintervall darstellen. Auf solche Weise sind alle bisher nicht zu erklärenden periodischen Aktivitätsrhythmen der Bienen zu beschreiben. Die Korrelation überrascht: sie ist ideal bis sehr gut.

Den folgenden Hypothesen liegen Versuche zugrunde, die durch die biomagnetischen Arbeiten über den Schwänzeltanz der Honigbiene im Sommer 1964 angeregt wurden. Sie entwickeln eine neue Theorie der Orientierung in der Zeit („Zeitsinn") und der Biorhyth-

mik überhaupt. Die Theorie basiert auf der Analyse von etwa 450 tagesperiodischen Kurven, eigenen und solchen aus der umfangreichen Literatur. Das Folgende gibt eine Zusammenfassung; auf Einzelheiten wird nicht eingegangen. Sie werden an anderer Stelle vorgelegt werden.

I. Der Zeitsinn

Zur Methode

Die Bienen wurden in Flugräumen unter Dauerlichtbedingungen (LL) gehalten. Lichtintensität, Temperatur (± 0,25°) und relative Feuchte (± 2–3%) blieben konstant. Für die Zeitdressur werden individuell markierte Bienen (von Frisch) verwendet. Es wird streng darauf geachtet, daß keine Neulinge zu der Sammelschar stoßen. Die Dressurzeit beträgt stets 2 Stunden zu einer bestimmten Tageszeit. In der Regel wird 5 Tage nacheinander dressiert. Getestet wird durch Registrierung der Aktivität individueller Bienen jeweils über einen Zeitraum von 15 Min.

Auswertung der Aktivitätskurven: Wenn die Kurven nur einfaches Anschauungsmaterial darstellen, werden sie im Original wiedergegeben, also so, wie sie registriert worden sind. Für den Vergleich mit Kurven aus der Geophysik oder Astronomie werden die Kurven geglättet, wie es in der Geophysik üblich ist [$(a + 2b + c) : 4$; bzw. $(a + 2b + 3c + 2d + e) : 9$].

Orientierung in der Zeit (Zeitsinn)

Der Zeitsinn wurde bislang unter Veränderungen verschiedenster physikalischer und geophysikalischer Bedingungen geprüft. Werden die eigenen und die in der Literatur vorliegenden Ergebnisse nur unter Veränderung eines *einzigen* Parameters aufgelistet, so ergibt sich:

Kein Einfluß auf die Orientierung in der Zeit ist unter folgenden Bedingungen festgestellt worden:

1. durch Änderung der Schwerkraft bis zu 3g. Dies gilt sowohl für Änderungen in der Horizontalen (etwa gleichbleibende Zentrifugalkraft) als auch in der Vertikalen (sinusförmige Änderung der Schwere). Dies gilt auch für die Änderung des Drehsinnes der „Bienenzentrifuge" in verschiedenen Raumlagen (mit oder gegen die Corioliskraft). Schwereänderungen, in welcher Raumlage auch immer vorgenommen, haben *keinen* Einfluß.

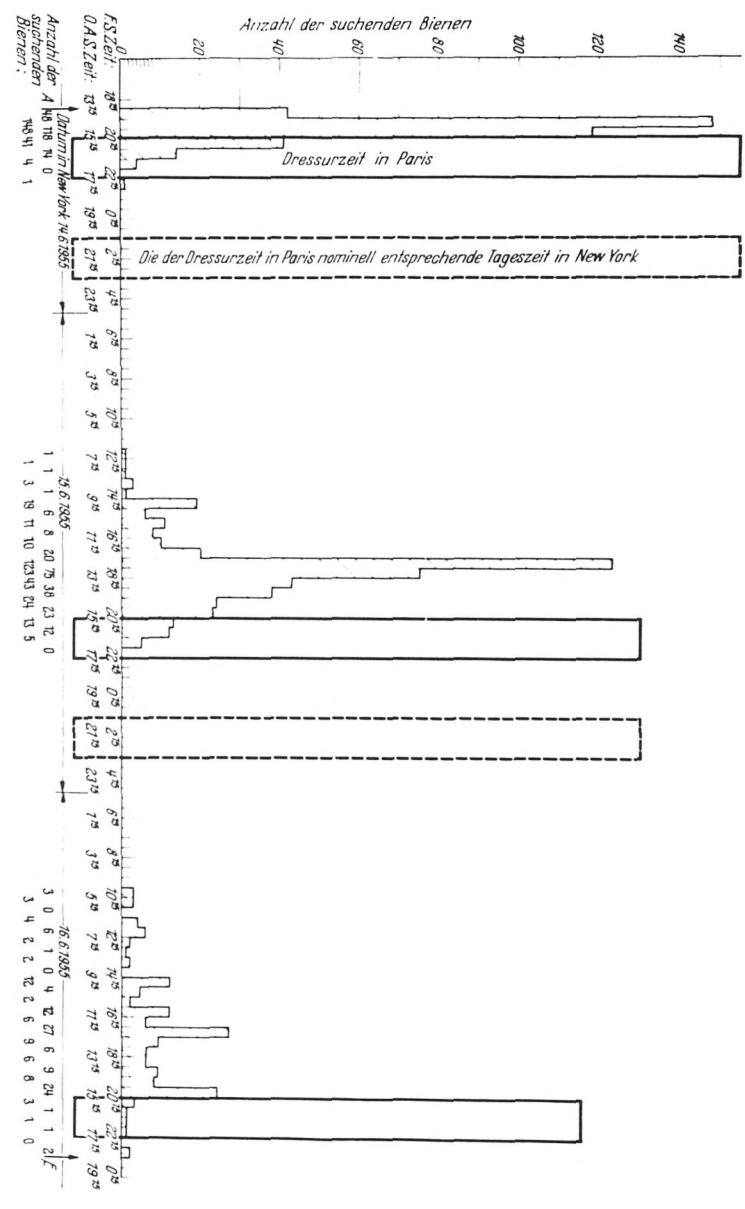


Abb. 1. Transozeanversuch von M. Renner 1955 von Paris nach New York. Dressurzeit in Paris von 20.15–22.15. F. S. Zeit: Französische Sommerzeit. O. A. S. Zeit: Ostamerikanische Sommerzeit (aus Renner, 1957)

2. Elektrische Abschirmung des Flugraumes: Bei vollständiger Abschirmung durch Kupferfolie ist kein Einfluß nachweisbar.
3. Radioaktive Strahlung in der Luft (Wahl, 1932): Es ist kein Einfluß nachweisbar.
4. Magnetische Wechselfelder zwischen 5–750 Hz haben keinen Einfluß.
5. Versetzungsversuche in der geographischen *Länge:* Zeitdressierte Bienen wurden im Flugzeug von Paris nach New York versetzt und umgekehrt (Renner, 1957):

Paris: Breite $\varphi = 48° 52'$ N; Länge $\lambda = 02° 20'$ E;
New York: $\varphi = 40° 40'$ N; $\lambda = 73° 50'$ W.

Auch hier war der Zeitsinn nicht gestört. Die in Paris auf eine bestimmte Zeit dressierten Bienen waren auch in New York zu der in Paris festgelegten Dressurzeit aktiv und umgekehrt (Abb. 1). Das Ergebnis wird als ein klassischer Beweis für eine endogene, circadiane Rhythmik – oder besser für einen endogenen Zeitsinn – angesehen. Es sind zweifelsfrei sehr elegante und einwandfreie Versuche, sowohl von der Idee her als auch in der Durchführung. Es wird sich aber – in Verbindung mit anderen Versetzungsversuchen – zeigen, daß gerade diese Experimente sich durch geophysikalische, exogene Faktoren erklären lassen.

Andererseits wurde ein Einfluß auf die Zeitorientierung in folgenden Experimenten festgestellt:

1. Störungen des erdmagnetischen Feldes haben einen gravierenden Einfluß auf die Zeitorientierung. Die Störung kann beruhen: auf natürlichen Störungen des EMF, die immer wieder auftreten (während der Versetzungsversuche von Renner (1957) traten zufällig keine solchen Störungen auf); auf einer Eisenarmierung am Bienenstock; auf künstlich erzeugten Störungen des EMF durch Verwendung von Helmholtzspulen (Abb. 2).

2. Versetzungsversuche in der geographischen *Breite:* Auf eine bestimmte Zeit dressierte Bienen wurden im Flugzeug oder Auto von Frankfurt a. M. ($\varphi = 50° 6'$ N; $\lambda = 8° 41'$ E) bzw. Würzburg ($\varphi = 49° 48'$ N; $\lambda = 9° 56'$ E) nach Messaure ($\varphi = 66° 42'$ N; $\lambda = 20° 25'$ E) in Schwedisch Lappland versetzt und nach Dressur in Frankfurt bzw. Würzburg in Messaure getestet und umgekehrt. In jedem Fall sind die Bienen zunächst in der Zeit desorientiert, zeigen jedoch nach

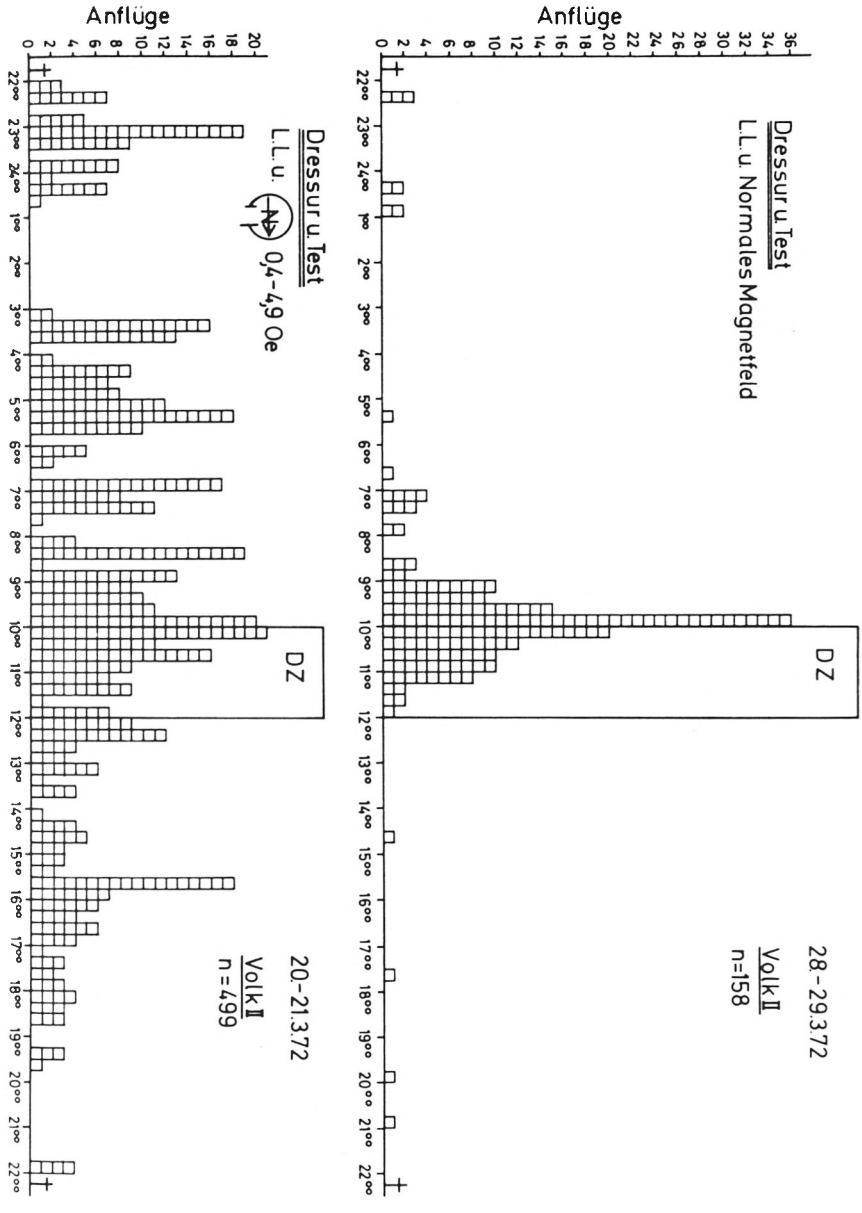


Abb. 2. Zeitsinnversuch. Dressurzeit: 10.00–12.00. 28./29. 3. Kontrolle unter normalen EMF-Bedingungen: 20./21. 3. EMF künstlich gestört durch Helmholtzspulen

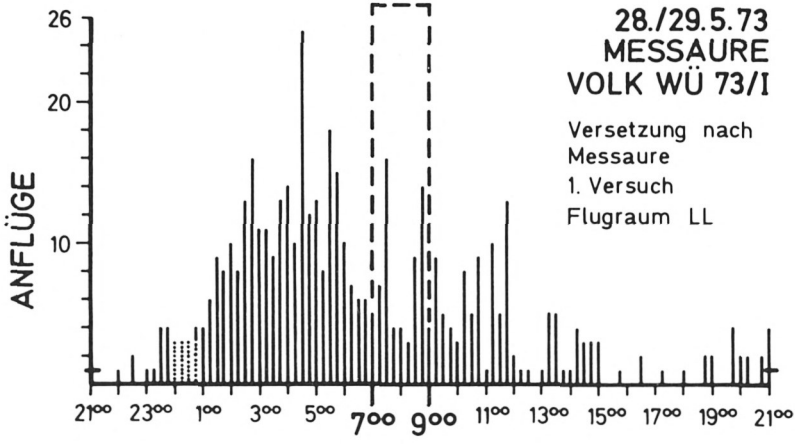


Abb. 3. Versetzungsversuch per Flugzeug von Würzburg nach Messaure (Schwedisch Lappland). Dressurzeit von 7.00–9.00. Letzte Dressur in Würzburg 27. 5. 1. Versuch

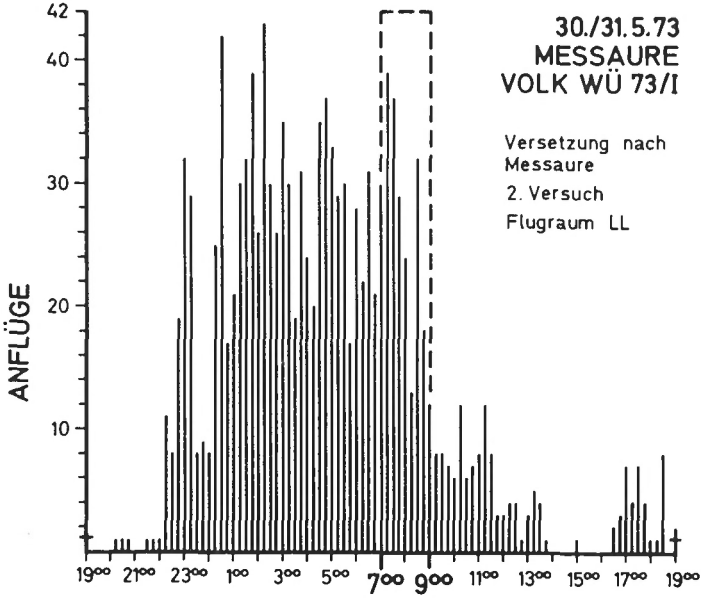


Abb. 4. Versetzungsversuch Würzburg – Messaure. 2. Versuch. Am 30. 5. wurde durch Fütterung von 7.00–9.00 die Dressur „aufgefrischt"

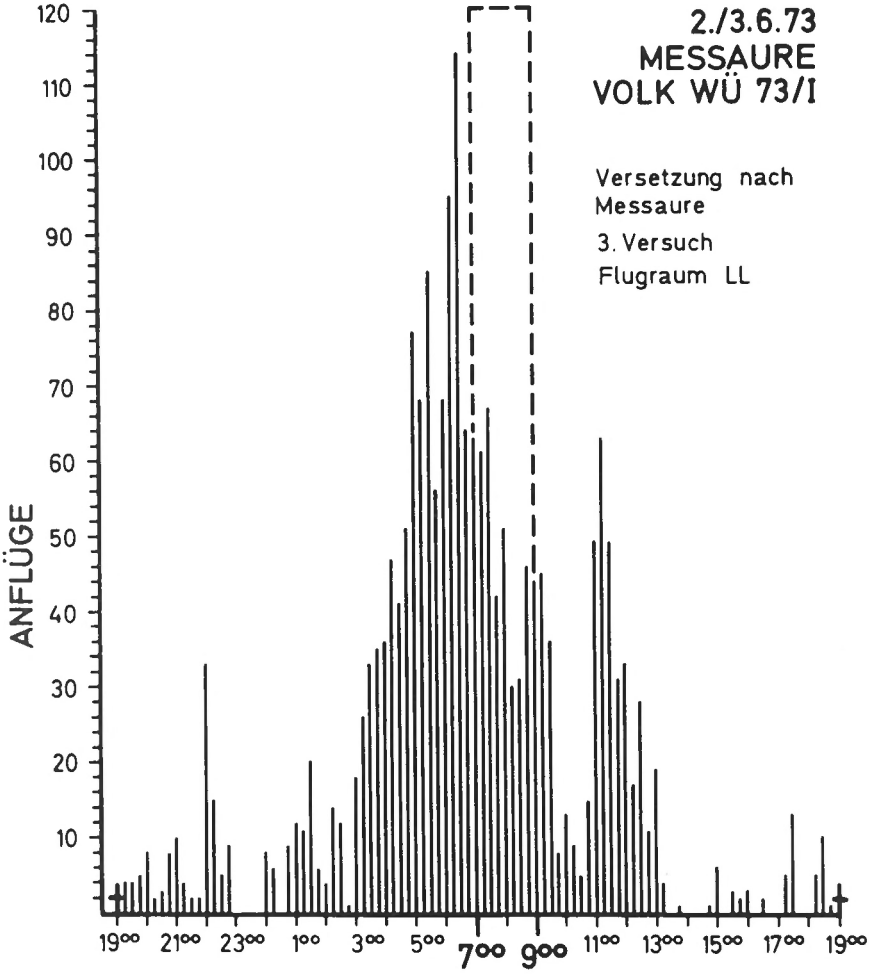


Abb. 5. Versetzungsversuch Würzburg – Messaure. 3. Versuch. Am 1. 6. und 2. 6. Fütterung von 7.00–9.00

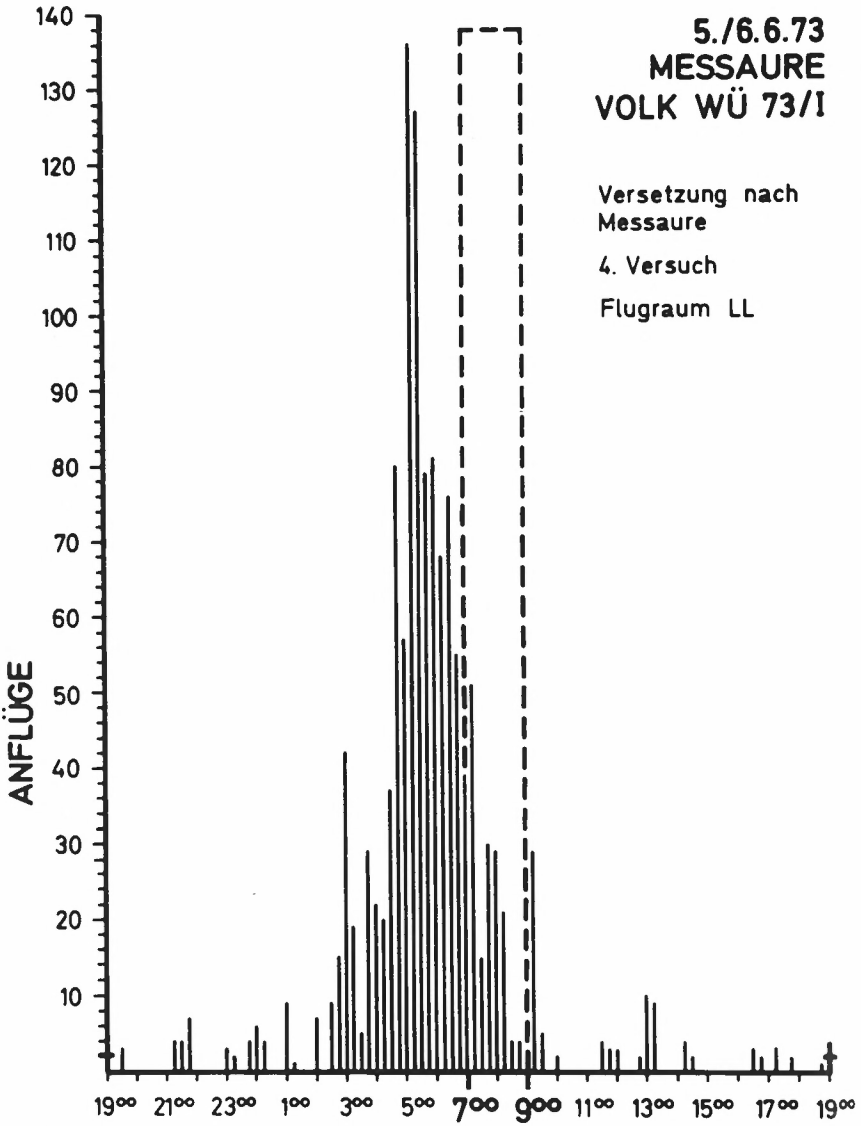


Abb. 6. Versetzungsversuch Würzburg – Messaure. 4. Versuch. Fütterung der Bienen am 4. 6. u. 5. 6. zwischen 7.00 u. 9.00. Erst 10 Tage nach der letzten Fütterung in Würzburg und 5 Zwischenfütterungen gelingt eine saubere Zeitdressur

etwa 8–12 Tagen eine, wenn auch um 1–2 Stunden abweichende Orientierung gegenüber der Dressurzeit am Herkunftsort (Abb. 3–6).

3. Transplantation von Pilzkörpern (Corpora pedunculata). Die Pilzkörper sind gestielte scheibenförmige Anhäufungen von Neuronen im Bereich des Protocerebrum bei Insekten.

Zwei Bienenvölker wurden in getrennten Flugräumen aufgestellt. Die Sammelscharen (20–35 Bienen) wurden entweder simultan auf unterschiedliche Tageszeit (8–12 Stunden Differenz) dressiert, oder das eine Volk (Empfänger) wurde rund um die Uhr gefüttert (keine Zeitdressur). Den Bienen der einen Sammelschar (den Spendern) wurden nach der Dressur die Pilzkörper – zwei je Biene – herausoperiert und den Bienen der anderen Sammelschar (den Empfängern) in die Kopfkapsel implantiert. Dann wurden rund um die Uhr (5–7 Tage lang) die Aktivitäten (Anflüge pro 15 Min.) beobachtet.

Ergebnis (in der Regel): Am 1. Tag kommen die Wirtsbienen zu ihrer eigenen Dressurzeit, wenn sie zeitdressiert waren. Am 2. Tag war die Aktivität während der eigenen Dressurzeit nur noch schwach oder überhaupt nicht mehr vorhanden (Abb. 7). Vom 3. Tag an bis zum 5. Tag – der Zeitpunkt war individuell verschieden – wurde eindeutig die Spenderzeit markiert. Diese Aktivität ist im Gegensatz zu Normaltieren meist sehr „straff" gesetzt, d. h. ihr zeitlicher Rahmen war eng (Abb. 8). In Abb. 9 ist eine normierte Zusammenfassung von 7 Experimenten dargestellt. Insgesamt sind über 25 Experimente mit z. T. variierendem Ansatz gemacht worden. Das Phänomen der Informationsübertragung trat in allen Experimenten auf. (Auf Feinheiten kann hier nicht eingegangen werden.)

Die Transplantationsexperimente kann man auch mit gefrorenen Pilzkörpern durchführen. Wir haben von Abisko ($\varphi = 68° 21'$ N; $\lambda = 18° 49'$ E) und Umeå ($\varphi = 63° 49'$ N; $\lambda = 20° 17'$ E) die Pilzkörper zeittrainierter Bienen nach Würzburg gebracht und hier getestet. Dabei konnten wir die Versetzungsversuche mit Normaltieren bestätigen; es konnte keine Zeitorientierung festgestellt werden.

Analysiert man die einzelnen Kurven, so treten Periodenlängen von $\tau = 22$ Std. bis zu $\tau = 27$ Std. auf. Das gleiche gilt im Regelfall für Experimente von Normaltieren; hier liegen ebenfalls die Periodenlängen zwischen 22 und 27 Stunden.

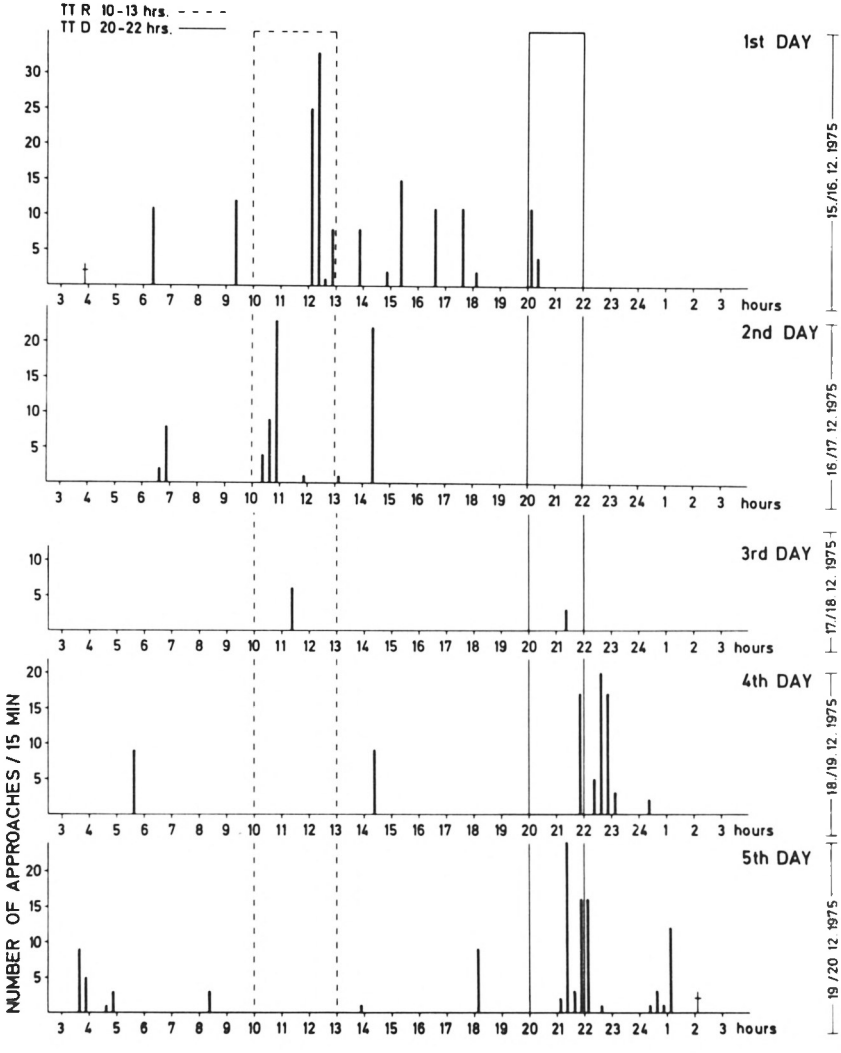


Abb. 7. Transplantationsexperiment mit Pilzkörpern. Originalregistrierung. Wirte und Spender sind „zeitdressiert". Dressurzeit der Wirte von 10.00–13.00, die der Spender von 20.00–22.00. D = Donor; R = Recipient

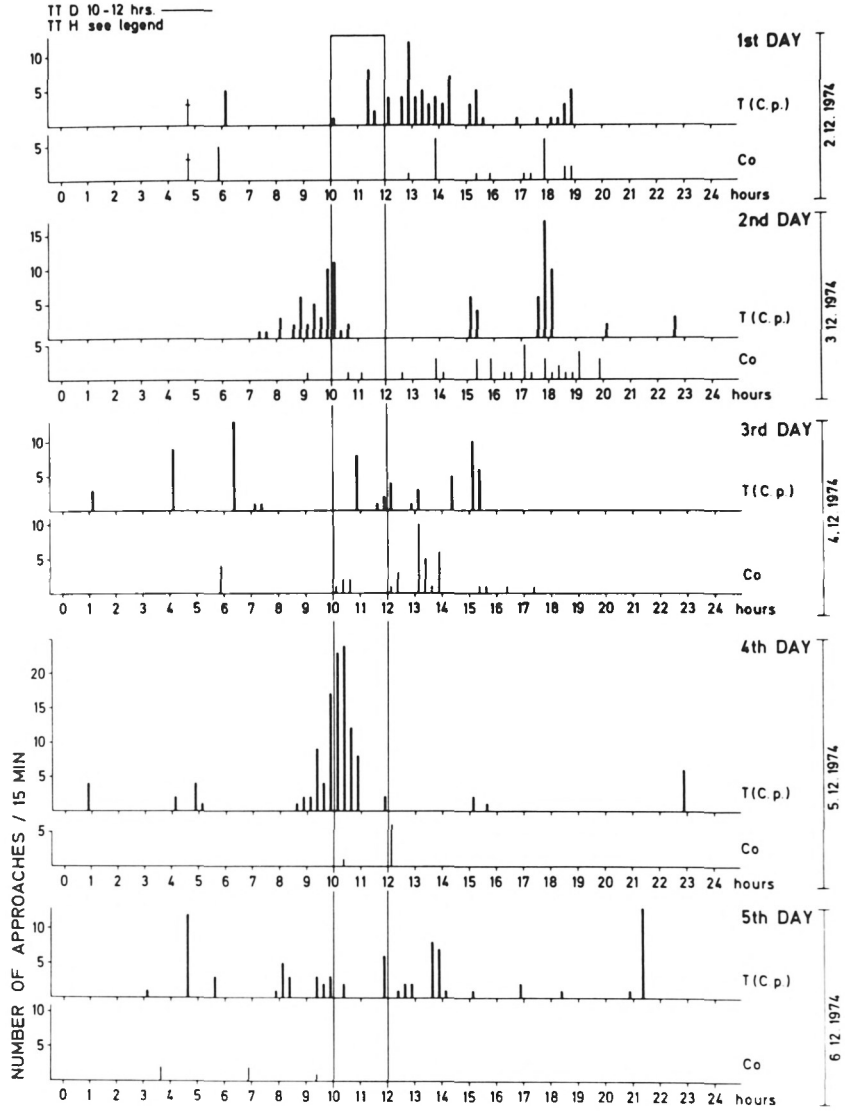


Abb. 8. Transplantationsexperiment. Originalregistrierung. Wirte sind über 50 Std. rund um die Uhr dressiert worden. Spenderdressurzeit von 10.00–12.00. T (C. p.) = Testtiere (Empfänger von Corpora pedunculata). Co = Kontrollen

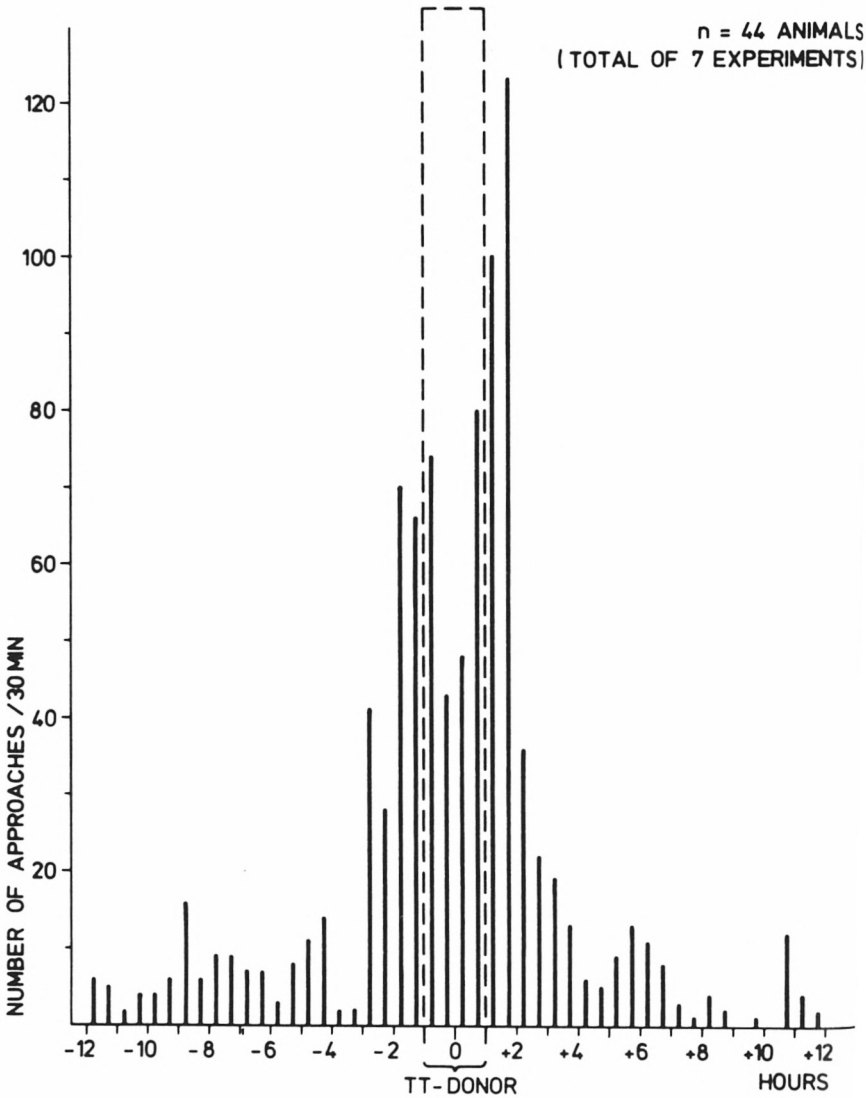


Abb. 9. Ergebnisse aus 7 Transplantationsversuchen normiert zusammengefaßt. TT-Donor = Dressurzeit der Spender

4. Die Beziehungen der Zeitdressur zum Erdmagnetismus

a) Das erdmagnetische Feld

Das EMF hat eine gewisse Größe: In Würzburg, Frankfurt a. M. und Paris beträgt die Inklination etwa 65°; in New York 70°. Die Totalintensität in Würzburg, Frankfurt a. M. und Paris 4700–4800 gamma (1 gamma = 10^{-5}*Oe*; *Oe* = elektromagnetische Einheit); in New York 56000 gamma. In diesen Größen offenbaren sich beträchtliche Differenzen zwischen den Orten Würzburg, Frankfurt a. M. und Paris einerseits und New York andererseits. Sie haben, wenn ja, nur geringe Bedeutung. *Entscheidend jedoch ist die magnetische Horizontalkomponente H.* Sie beträgt in Würzburg, Frankfurt a. M. und Paris 20000–20500, in New York 19500 gamma. In Nordschweden liegt die Inklination zwischen 73,5° und 79,5°, die Stärke der Totalintensität zwischen 50000 und 58000 gamma, je nach Versuchsort. Die Horizontalkomponente jedoch liegt zwischen 9500 und 10500 gamma. Diesem konstanten Feld sind die tagesperiodischen Schwankungen überlagert, die im wesentlichen auf Sonne ($^9/_{10}$) und Mond ($^1/_{10}$) zurückgehen. Sie betragen in Würzburg und Frankfurt an erdmagnetisch normalen Tagen zwischen 50 und 150 gamma, in Nordschweden bis zu 300 gamma.

Aus den horizontalen Komponenten *X* (geographisch Nord+, Süd−) und *Y* (geographisch Ost+, West−) der täglichen magnetischen Variation (Δ gamma) wird der Mittelwert als horizontaler Vektor berechnet, sein Umlauf als „magnetischer Azimut der Variation" bezeichnet. Der magnetische Azimut ist an aufeinander folgenden Tagen kleineren oder größeren Schwankungen unterworfen. Selten ist er von einem zum anderen Tag identisch. Zu dem können von Tag zu Tag charakteristische Phasenverschiebungen der magnetischen Schwankungen auftreten. Der magnetische Azimut ist etwa geomagnetisch breitenspezifisch.

Außerdem treten Störungen des mehr oder weniger ruhigen Schwingungsverlaufes auf (magnetische Stürme).

b) Der Zusammenhang zwischen „Zeitsinn" und „ruhigem" EMF

b. 1. Die Schwankungen und Phasenverschiebungen des EMF an magnetisch normalen und ruhigen Tagen sind die Ursache für die unterschiedlichen Periodenlängen in den Aktivitäten nach einer Zeit-

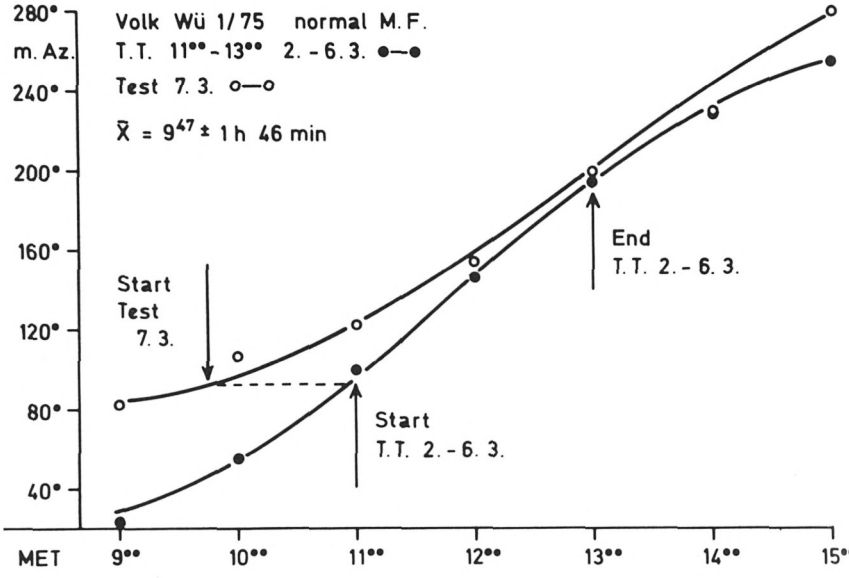


Abb. 10. Zeitsinnversuch bei normalem EMF.
m. Az. = magnetischer Azimut; T. T. = Training Time (11.00–13.00). Dressur vom 2.–6. 3. Test am 7. 3.
$\bar{x}$ = Mittelwert der Aktivitätsverteilung am Testtag.
Bienen erscheinen dem m. Az. folgend zu früh am Futterplatz

dressur. Die Bienen merken sich den speziellen magnetischen Azimut zur Dressurzeit (2 Stunden) am letzten Dressurtag. Am folgenden Tag (dem Test) erwarten sie zur gleichen Azimutstellung die Fütterung. Läuft die Phase der erdmagnetischen Schwankungen vor, so kommen die Bienen entsprechend früher zum Futter (Abb. 10), läuft sie nach, so kommen sie später (Abb. 11). – Das gleiche gilt auch bei Transplantationsexperimenten: Durch den Pilzkörper wird *magnetische* Information auf den Wirt übertragen.

b. 2. Dazu kommt ein zweiter Mechanismus. Er kann aus den Transozeanversuchen von Renner (1957) abgeleitet werden. In ihnen ist die Phase der täglichen Variation des magnetischen Azimutes erheblich größer als entsprechende Phasenverschiebungen am gleichen Ort an aufeinanderfolgenden Tagen. Diesen großen Phasenverschiebungen folgen die Bienen nicht mehr. Ihre Aktivität beginnt in New York nicht zur gleichen Azimutlage des EMF, sondern etwa zur

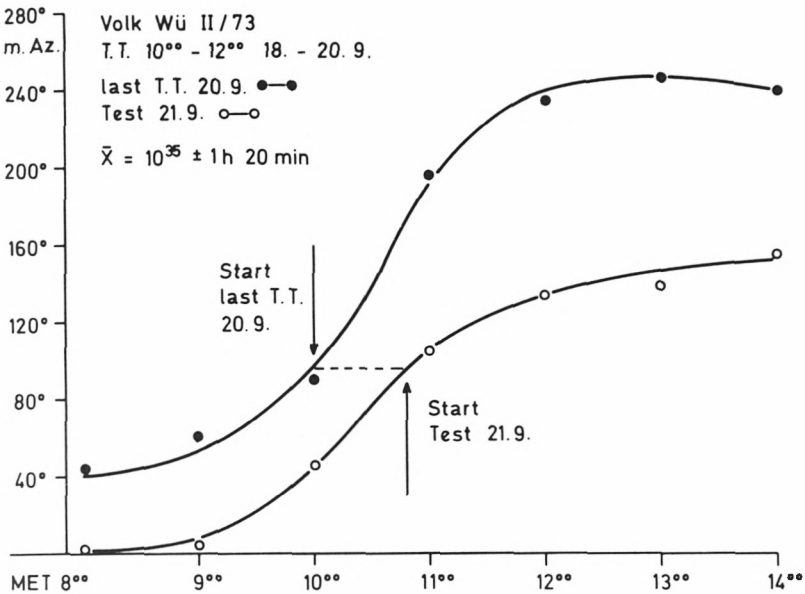


Abb. 11. Zeitsinnversuch bei normalen EMF. T. T. 10.00–12.00. $\bar{x}$ = Mittelwert der Aktivitätsverteilung am Testtag. Folgend dem m. Az. kommen die Bienen zu spät zum Futterplatz

gleichen Zeit, wie wenn sie noch in Paris wären. Zur Erklärung dient folgende Hypothese: Der magnetische Mechanismus arbeitet nach dem Kreiselprinzip. Ein solcher Kreisel ist unabhängig von der Ortsverschiebung. Er weist stets die gleiche Richtung (Null-Lage), solange keine verändernden Kräfte auf ihn einwirken. Die Bienen werden aktiv, sobald die gleiche Kreiselstellung wieder erreicht ist, d. h. wenn vom Moment der Festlegung der Null-Lage der magnetische Azimut einen Vollkreis (360°) durchlaufen hat (Abb. 12). Wichtig ist nun, daß die Ortsverschiebung auf der gleichen *Isodyname der Horizontalkomponente* erfolgt. Nur unter dieser Bedingung kann die Drehung von den Bienen registriert werden. Der „Zeitsinn" beruht also auf einem Trägheitskreisel, der auf *magnetischer* Basis – in engem Bandbreitenbereich in bezug auf die Horinzontalkomponente – arbeitet und *zeitunabhängig* ist; somit hat der Mechanismus primär nichts mehr mit Zeit zu tun. Der „Zeitsinn" in dieser Form ist also ein magnetischer Sinn und dadurch den anderen Sinnesmodalitäten gleichgestellt, also nichts besonderes. Das zeigen auch alle jene Expe-

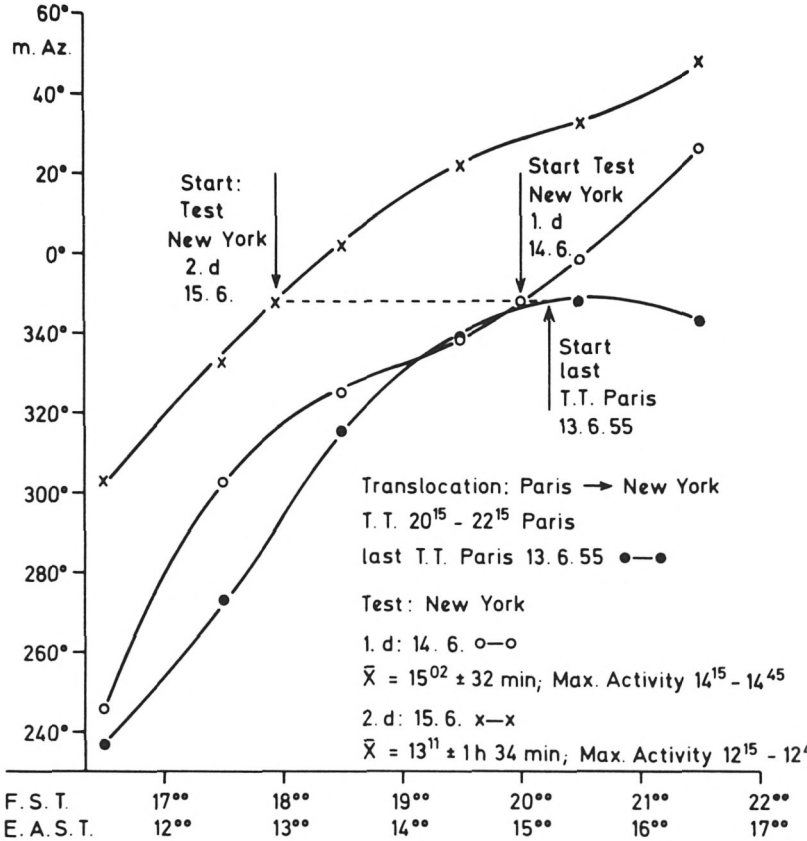


Abb. 12. Transozeanversuch von M. Renner von Paris nach New York. Ergebnis aus Abb. 1 in Beziehung zum mag. Azimut. Der m. Az. ist in New York entsprechend der Phasenverschiebung zwischen Paris und New York korrigiert (+ 76°). Man beachte das „Vorauseilen" der Bienen am 2. Tag (15. 6.) um ca. 2 Std.

rimente, in denen die Zeit als *Variable* in Erscheinung tritt und keine Konstante ist.

c) Wirkung gestörter EMF

Treten während der Dressurzeit oder während der Testzeit natürliche, größere Störungen des EMF auf, so ist keine Dressur auf Zeit möglich. Das gleiche gilt für die Transplantationsexperimente: Treten während der Dressurzeit des Spenders oder während des Tests der Wirte magnetische Störungen auf, also an Tagen, an denen sich

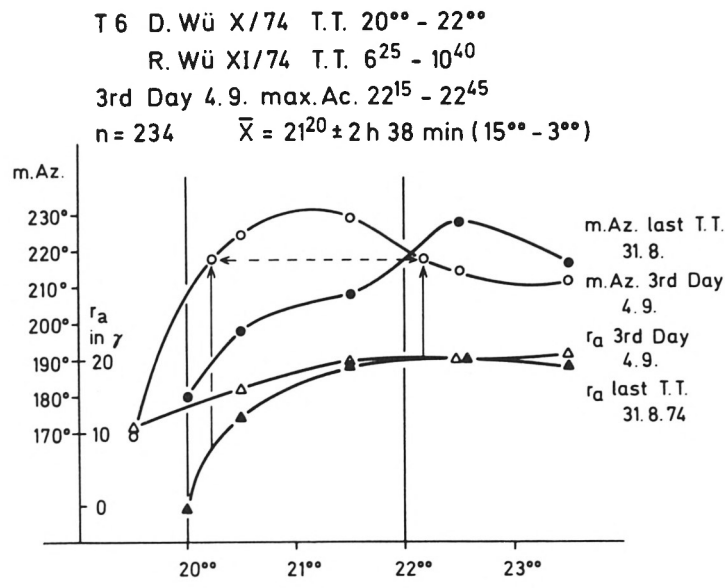


Abb. 13. Transplantationsversuch. Spenderdressurzeit 20.00–22.00.
● Geschlossene Kreise: mag. Azimut am letzten Dressurtag der Spender.
○ Offene Kreise: mag. Azimut am 3. Testtag der Wirte.
▲ Geschlossene Dreiecke: Skalar des Radiusvektors am letzten Dressurtag der Spender.
△ Offene Dreiecke: Skalar des Radiusvektors am 3. Testtag der Wirte. Durch den Skalar des Radiusvektors wird der Abruf der Information eindeutig auf 22.12 (mag. Az. 218°) festgelegt

auch kein normaler magnetischer Azimut berechnen läßt, so ist das Ergebnis der Transplantation negativ.

In der Geophysik wird der magnetische Azimut durch Mittelung über die Tageswerte bestimmt; d. h. die Tagesmittelwerte legen das Nullniveau der Variation fest. Die Bienen können sich dieses Mittelwertes nicht bedienen; denn wie sollen sie, z. B. bei einer Dressurzeit von 10–12 Uhr, während der Dressurzeit bereits vom Tagesmittelwert Kenntnis haben? Sie sind gezwungen, in der *Nachhalte* zu justieren. Das straffe Setzen der Wirtsaktivität im *Bereich der Spenderzeit* bei den Transplantationsexperimenten läßt eine Analyse möglich erscheinen. Aus vielen Möglichkeiten soll hier nur auf eine hingewiesen werden, der eine hohe Wahrscheinlichkeit an Verifizierbarkeit zukommt. Sie ist bisher an 5 Versuchen geprüft worden. In Nuancen

unterscheiden sich alle Normalversuche von den Transplantationsexperimenten. Bei Normaltieren wird bevorzugt der Beginn der Dressurzeit markiert, in den Transplantationsversuchen das Ende. Das könnte neurophysiologisch durch einen positiven Feedback-Mechanismus bei Normaltieren erklärt werden, der im entnommenen, neuronal isolierten Pilzkörper nicht mehr möglich ist. Die Bienen legen mit den *momentanen* magnetischen Daten zu Dressurbeginn das Nullniveau fest, die sogenannten Nullpunkte (ähnlich den Nullpunkten bei der Mißweisung). Da der magnetische Azimut in kleinen Bereichen durch kurzzeitigen *Rücklauf* doppeldeutig ist, wird im Skalar des Radiusvektors eine zusätzliche Sicherheit eingebaut. Der Abruf der Information im Wirt erfolgt dann optimal, wenn magnetischer Azimut und momentaner Radiusvektor *identisch mit der magnetischen Situation während des Speichervorgangs im Spender* sind (Abb. 13). Da diese Nullpunkte für die gleiche Tageszeit *nicht periodisch konstant* sind, ist dies ein weiterer Beleg dafür, daß der „Zeitsinn" primär mit Zeit im physikalischen Sinn nichts gemein hat. Solche Feinheiten sind generell aus Experimenten an Normaltieren nicht mehr zu analysieren. Dafür sind die Ergebnisse zu „biologisch" und zu wenig „physikalisch".

Jetzt sind auch die Ergebnisse der Versetzungsversuche in der geographischen Breite voll verständlich geworden. Die geophysikalischen Parameter werden generell als geomagnetisch breitenspezifisch bezeichnet. Exakt trifft dies jedoch nur für die Horizontalkomponente zu. Das permanente Magnetfeld dient zur Justierung (wieder eine Parallele zur Mißweisung). Wird bei Nord-Süd-Versetzung ein gewisser Differenzbereich in den magnetischen Parametern überschritten, so kann das beschriebene System nicht mehr arbeiten. Es ist außerhalb des natürlichen physiologischen Bereiches. Erst Adaptation durch Neujustierung ergibt einen neuen Arbeitsbereich.

Durch weitere Versetzungsversuche soll die Sensitivität des Grenzbereiches bestimmt werden.

II. Rhythmik

1. Präferenz im natürlichen EMF

Wie sieht die Aktivitätsverteilung bei ständiger Fütterung (24 Stunden) einer Bienenschar über den ganzen Tag aus, wenn Licht und Temperatur ebenfalls über Tage konstant gehalten werden? Derartige Versuche sind sehr diffizil und voller möglicher Fehlerquellen; sie setzen eine gründliche Kenntnis des Verhaltens der Bienen und noch mehr an Erfahrung im Flugraum voraus.

Zur Methode

Die Sammelschar besteht wiederum aus 25–30 markierten Bienen. Neulinge dürfen nicht zur eingeflogenen Schar kommen. Auch wenn sie rasch abgefangen werden, ist das Ergebnis mindestens eines Tages verfälscht. Bei diesen Versuchen wird photomechanisch (automatisch) registriert.

Ergebnis

Die Bienen zeigen schöne, schwingende, freilaufende Aktivitätskurven, die breitenspezifisch und jahreszeitlich verschieden sind (im Winter ist die Variationsbreite geringer).

Die Beziehung zum magnetischen Variationsfeld

Auch dafür ist das magnetische Variationsfeld verantwortlich. Aber nicht nur eine Ebene, sondern der *gesamte Variationsraum*. In erster Näherung besteht eine gute Korrelation zur Z-Komponente (also die Komponente senkrecht zur X-Y-Ebene). Der Vektor ΔZ der Z-Komponente ist – vereinfachend gesagt – am Tage abwärts, nachts aufwärts gerichtet. Es liegt kein stationäres System vor, sondern ein langsam um die Hochachse rotierendes, entsprechend der Drehung des magnetischen Azimuts. Hier liegt die Vermutung nahe, daß der zugrunde liegende Wirkungsmechanismus einem *langsamen* gyromagnetischen Effekt ähnlich ist. Denn bei der Berechnung von „Intensitätskurven" über den Tag (in Stundenintervallen) kommt der jeweiligen Azimutwinkelgeschwindigkeit ($\Delta\beta$) je nach Raumla-

ge der magnetischen Höhe (α) (berechnet aus ΔX, ΔY und ΔZ; s. Abb. 14) – unter oder über dem Horizont – eine unterschiedliche Bewertung zu (positiv bzw. negativ).

Die Berechnungen von „relativen Intensitätskurven" über den Tag in Stundenintervallen nach folgenden empirisch gefundenen Formeln stehen in guter bis sehr guter Korrelation mit den Aktivitätskurven.

Ist die magnetische Höhe negativ, so gilt:

Die Aktivität ist proportional zu

$1 + \sin \alpha + \sin \Delta\beta$;

wenn die magnetische Höhe positiv ist, ist die Aktivität proportional zu

$1 + \sin \alpha - \sin \Delta\beta$,

wobei $\alpha \triangleq \alpha\,[h_m]$ die magnetische Höhe und $\Delta\beta \triangleq \Delta\beta\,[Az_m]$ die Azimutwinkelgeschwindigkeit der jeweiligen Tagesstunde des Radiusvektors im Hodographen des magnetischen Variationsfeldes ist. Der magnetische Höhenwinkel α geht als Absolutwert und immer *positiv*, die azimutale Winkelgeschwindigkeit je nach Raumlage der magnetischen Höhe *positiv* oder *negativ* in die Berechnung ein. Der Magnetkreisel ist im Schwerefeld der Erde und nicht im EMF justiert. Die additive Größe 1 trägt der Tatsache Rechnung, daß die Aktivitätskurven in den Minima nie null sind, d. h. sie ist Ausdruck eines spezifischen *konstanten Faktors* dieser Kurven, also eine Konstante. In Abb. 14 ist der „Magnetkreisel", in Abb. 15 sind Ergebnisse zu verschiedenen Jahreszeiten und aus unterschiedlicher geographischer Breite dargestellt. Wie die Ergebnisse zeigen, können hier mehrere Tage zusammengefaßt werden. Die Feinanalyse zeigt, daß eine Abhängigkeit von den Mondphasen besteht. Nicht verwunderlich, da ja die magnetische Variation mondphasenabhängig ist. Für die Aktivitätskurven in Umeå haben wir die entsprechenden magnetischen Daten aus Kiruna bekommen. Diese Meßstation scheint jedoch zu weit von den Bienen entfernt gelegen zu sein, zumal im Norden gravierende Änderungen im Variationsfeld auf kürzere Entfernung auftreten als in den mittleren Breiten. Das mag die nur „tendenzmäßig" aufgezeigte Korrelation bedingen.

Auf diese Weise konnte bei den Bienen ein free-running-Mechanismus nachgewiesen werden, der allein vom Hodographen des magnetischen Variationsfeldes gesteuert wird.

Die Maxima der Aktivität treten nicht zu gleichen Uhrzeiten auf,

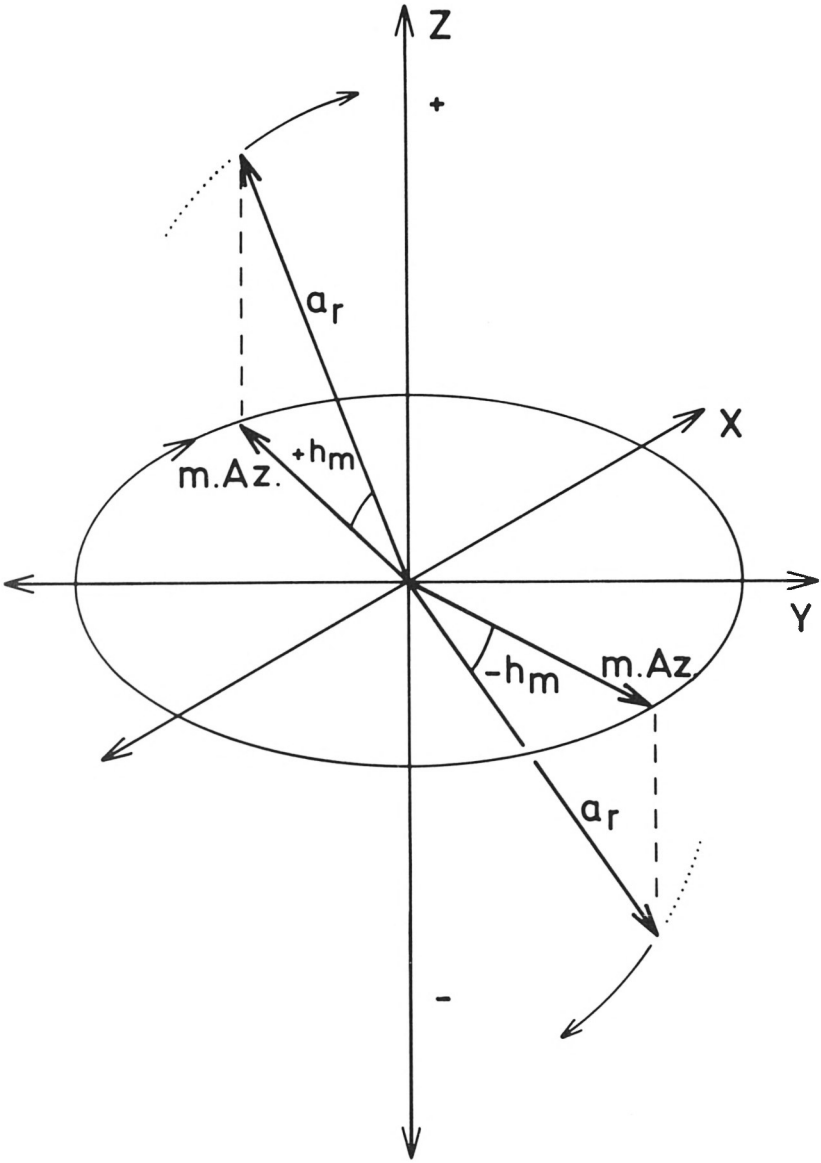
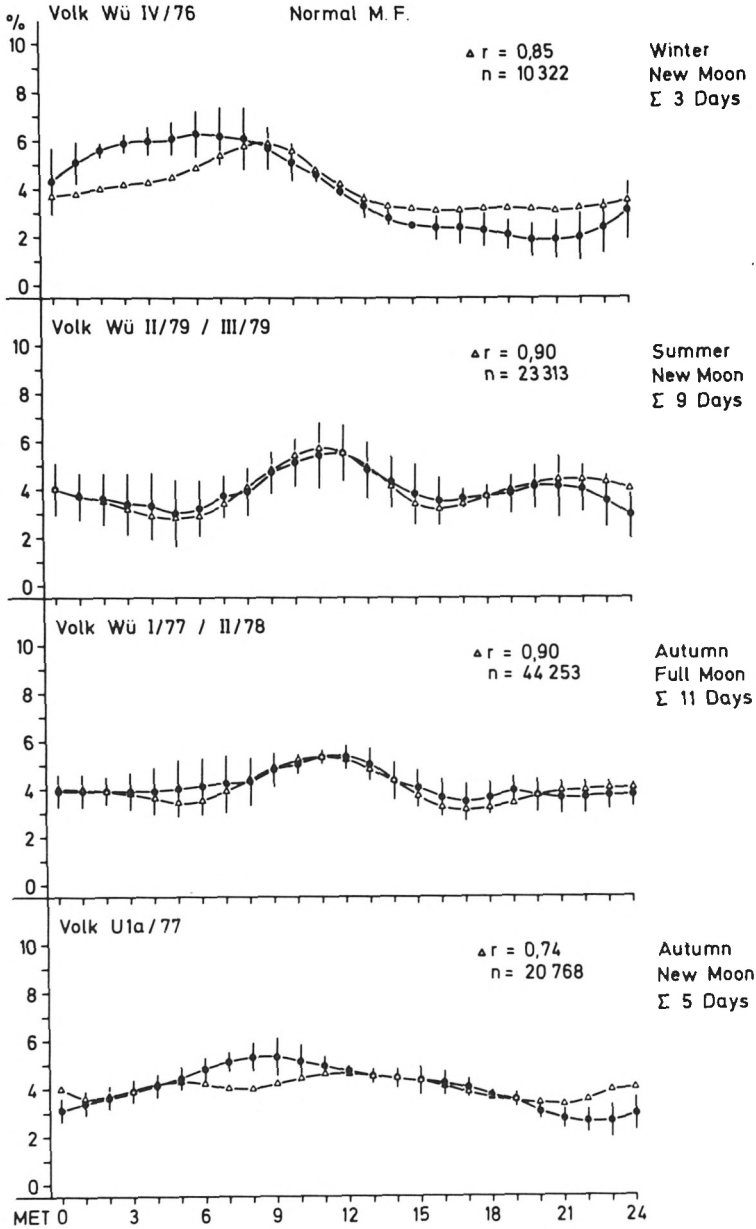


Abb. 14. „Magnetkreisel" der täglichen Variation des EMF.
X = Nord-Süd-Achse; Y = Ost-West-Achse; Z = Vertikalachse, nach oben +, nach unten −, $m.Az.$ = magnetischer Azimut;
h_m = magnetische Höhe vom „magnetischen Horizont" aus.
a_r = Raumvektor des Hodographen


%
Volk Wü IV/76
Normal M. F.
Δr = 0,85
n = 10 322
Winter
New Moon
Σ 3 Days
Volk Wü II/79 / III/79
Δr = 0,90
n = 23 313
Summer
New Moon
Σ 9 Days
Volk Wü I/77 / II/78
Δr = 0,90
n = 44 253
Autumn
Full Moon
Σ 11 Days
Volk U1a/77
Δr = 0,74
n = 20 768
Autumn
New Moon
Σ 5 Days
MET 0 3 6 9 12 15 18 21 24

sondern sie folgen dem Hodographen. Oder anders: Die Zeit, der die Rhythmik folgt, ist variabel, keine Konstante (verglichen mit der physikalischen Uhr). Es handelt sich deshalb um einen magnetischen Sinn komplexer Art, der im *räumlichen magnetischen Variationsfeld* arbeitet.

2. Präferenzen im künstlich gestörten EMF

Zur Methode

Der Bienenstock wird von 8 Helmholtzspulen (2m Durchmesser) umgeben. Die acht Spulen sind parallel zueinander aufgestellt, jeweils benachbarte haben jedoch entgegengesetzte magnetische Felder (durch entgegengesetzte Stromrichtung). Auf diese Weise entsteht ein für fliegende Bienen völlig wirres Magnetfeld, das auch zum EMF keinerlei Beziehung mehr hat.

Ergebnisse

Die Ergebnisse waren voller Überraschungen und ohne Trend zu den Erwartungen.

a) Zunächst sinkt die Aktivität innerhalb eines halben Tages um mindestens die Hälfte bis um zwei Drittel gegenüber den Präferenzaktivitäten im ungestörten EMF. Wahrscheinlich hat das einen biochemischen Grund, wie noch nicht abgeschlossene Analysen von am Energiestoffwechsel beteiligten Enzymsystemen zeigten. Außerdem: Mit Bienen in derartig gestörtem MF konnten Versuche bis zu drei Wochen durchgeführt werden. Im Vergleich dazu: Im natürlichen EMF bleibt meist nur eine Experimentierdauer von 5–7 Tagen. (Die Lebensdauer der Biene ist streng mit der erbrachten Aktivitätsleistung gekoppelt.)

b) Im Gegensatz zu den Experimenten im natürlichen EMF werden hier sehr ruhige Aktivitätskurven gemessen, die von Tag zu Tag

Abb. 15. Free-running: Präferenzaktivitätskurven unter Normalbedingungen (natürliches EMF) zu verschiedenen Jahreszeiten in Würzburg. Ein Versuch (Volk U 1 a/77) wurde in Umeå (Nordschweden) durchgeführt. Man kann die Versuche in der gleichen Mondphase im gleichen Jahr (s. Summer) oder aus 2 folgenden Jahren zur gleichen Jahreszeit (s. Autumn) problemlos zusammenfassen.
△ = aus dem „Magnetkreisel" berechnete „relative" Intensitätskurven;
• = (geschlossene Kreise) Präferenzaktivität der Bienen

gesetzmäßig um Nuancen differieren. Die Tageskurven schwingen nur einmal durch, d.h. sie haben 1 Minimum und 1 Maximum. Diese Minima und Maxima shiften meist vor oder zurück, jedoch nie über eine 23 Std.- bzw. 25 Std.-Periode hinaus. Die Kurven können auch scheinbar einige Tage stehen bleiben. Dann ist τ ca. 24 Std. Es erfolgt dann aber eine Nuancierung in der Modulation. (Das gilt für den Regelfall. Zunächst soll es genügen. 180 Kurven wurden bisher analysiert.)

Was für ein Mechanismus steckt hinter diesem Phänomen? Besteht irgendein Zusammenhang – und wenn er auch noch so maskiert erscheint – mit einem exogenen Faktor, oder tritt hier der Kern einer endogenen Periodik zutage? Es war – und ist immer noch – eine äußerst zeitraubende und schwierige analytische Arbeit, aus Dutzenden von Möglichkeiten auf die richtige Fährte zu gelangen, die den Kern des Problems beinhaltet.

Der Zusammenhang ist in der Astronomie zu suchen. Sonne und Mond sind die Quellen der Erscheinung. Ereignisse, die von Sonne und Mond ausgehen – welcher Natur sie auch immer sein mögen –, (hier braucht der Biologe dringend Hilfe) wirken auf die Biene. Oder anders ausgedrückt: Die Bienen orientieren sich nach solchen modulierten Ereignissen. Enttäuschend ist zunächst, daß keine, nicht einmal eine tendenzmäßige Beziehung zu den Gezeiten besteht, also zum klassischen Gezeitenpotential von Ebbe und Flut; das wurde durch Computeranalysen am geodätischen Institut in Darmstadt gezeigt.

Die astronomischen Grundlagen

Die Grundlage ist die sphärisch trigonometrische Beziehung zu Sonne und Mond. In dieser Raum-Konstellation steht die Biene immer im Zentrum („Selbstjustierung"; analog zur Mißweisung der Tanzrichtungen). Die Justierung der Biene erfolgt im Schwerefeld der Erde. Zu den räumlichen Beziehungen zwischen diesem Sonne-Mond-System kommen die zeitlichen. Die Raumkoordinaten und die Zeit (gemessen zwischen zwei identischen Ereignissen, also bezogen auf die jeweiligen Perioden) bilden ein vierdimensionales Kontinuum, das sich zyklisch wiederholt, aber für Sonne und Mond verschieden ist (Sonnentag bzw. Mondtag). In jedem System (Sonne bzw. Mond) ist der Raum *variant*, aber die Zeit (an den Perioden gemessen) *konstant*.

Noch eine weitere Überlegung muß hier eingeführt werden. Der Zeitlauf, also die Richtung, ist *nicht zyklisch*. Das bedeutet, daß periodisch sich wiederholende Ereignisse, z. B. ein Schwingungsvorgang, im Raum-Zeit-Kontinuum eine Spiralkurve durchlaufen, deren Intensitätsänderungen in kontinuierlich „aufeinanderfolgenden" Zeitebenen liegen. Man kann also Ereignisse auf zwei verschiedenen Wegen registrieren:

1. Es wird in Raumkoordinaten gemessen; dann ergibt sich die Zeit zwangsläufig.
2. Oder es wird die Zeit gemessen; dann ergeben sich daraus die Raumkoordinaten.

Der Raum wird durch den Azimut (Az) und die Höhe (h) zunächst wertungsfrei neutral beschrieben.

Die Aktivitäten der Bienen im Sonne-Mond-System bei gestörtem EMF.

Von Sonne und Mond gehen Ereignisse aus, die mit unterschiedlichen Intensitäten auf die Bienen wirken. In einem als *neutral* erscheinenden kugelförmigen Raum – „Sonnen-" und „Mondraum" sind bei dieser Betrachtung als solcher ausgewiesen – werden im Zentrum entweder keine Ereignisse oder aber Ereignisse mit *gleicher Intensität* aus allen Raumrichtungen registriert, wenn im ersten Fall kein rezipierender Apparat, im zweiten Fall zwar ein rezipierender Apparat vorhanden ist, aber *nicht fest* justiert im Koordinatensystem, so daß er keine Richtungscharakteristik der Empfindlichkeit aufweisen kann. Wird wiederum die Zeitkoordinate eingeführt, dann ergibt sich ein zylindersymmetrisches System. Wird des weiteren ein mit der *Zeit mitwandernder* Apparat mit periodisch sich ändernder Richtungsempfindlichkeit – fest in den Raumkoordinaten verankert – angenommen, dann ist *primär* die Empfindlichkeitsänderung auf azimutale Spannungs- oder Gewichtungsfaktoren zurückzuführen. Diese primäre Empfindlichkeitsänderung kann durch *sekundäre* Ereignisse moduliert werden. In den Termen $\sin Az$ (primär) und $\cos^2 h$ (sekundär) sind dynamisch sich ändernde Gewichtungsfaktoren – vom Justierungspunkt aus betrachtet – gegeben, die eine definierte Ereigniskurve im Raum beschreiben, deren Intensitätsänderungen diskreten Zeitebenen und Raumrichtungen zugeordnet sind. Also Gewichtungsfaktoren mit Richtcharakteristik. Ein System (Sonne oder Mond) stelle das

Führungssystem dar. Alle Koordinaten (des Raumes und der Zeit) werden in ein System transformiert. Meist ist das Mondsystem der Führungs- bzw. Bezugsraum und damit zugleich der Zeit. Jedoch kann das Führungssystem wechseln von Sonne zu Mond und von Mond zu Sonne. Die Räume sind nicht *variabel*, aber *variant*, bedingt durch die sich kontinuierlich, gesetzmäßig ändernden Azimutwinkelgeschwindigkeiten und Höhen. Als Führungsfeld sind sie im Moment der Transformation *invariant*, als Transformationsraum gesetzmäßig *variant* in bezug auf die Justierung in den astronomischen Koordinaten des Führungsfeldes. Der Transformationswinkel wird durch das Führungsfeld bestimmt. Der transformierte Raum ist somit nicht mehr durch seine „natürlichen" astronomischen Koordinaten beschrieben, sondern durch die des Führungsfeldes. Das bedeutet, daß die Gewichtungsfaktoren seiner „natürlichen" Koordinaten einer kontinuierlichen Änderung unterworfen sind.

Ein anschauliches Beispiel liefern die Registrierungen der astronomischen Daten des Mondes selbst. Durch einen Beobachter vom Mond aus betrachtet stellt sich dieser Vorgang schlicht als eine Transformation in den Sonnentagraum mit Sonnentagzeitperiodik dar, wie sie hier definiert ist. Natürlich zunächst ohne Gewichtung. „Reine" Meßdaten also. Die verwendeten astronomischen Daten sind in der Sonnentagzeitperiodik registriert.

Nach Berücksichtigung der dargelegten Fakten werden *rein geometrisch* aus der astronomischen Konstellation von Sonne und Mond – vom Versuchsort aus betrachtet – Ereigniskurven mit *relativen Intensitätsänderungen* (in willkürlichen Einheiten), die das Aktivitätsmuster der Bienen sehr gut bis ideal beschreiben (Abb. 16, 17 und 18), nach folgender Formel berechnet:

Aktivität der Bienen / Zeiteinheit

$\triangleq [0{,}46 \times (\sin Az\odot + \cos^2 h\odot) + (\sin Az\,☾ + \cos^2 h\,☾)]/\Delta t$ wobei t = const, gemessen in MET (Middle European Time), Δt = Stundenintervall (in allen Berechnungen); die Symbole $\odot$ bzw. ☾ gelten für Sonne bzw. Mond, 0,46 ist die Gezeitenkonstante. Auf den ersten Blick vermißt man einen Term, der die geographische Breite des Versuchsortes markiert. Sie ist im Azimut und in der Höhe enthalten.

Diese Grundformel kann auf mehrere Weise Abwandlung erfahren.

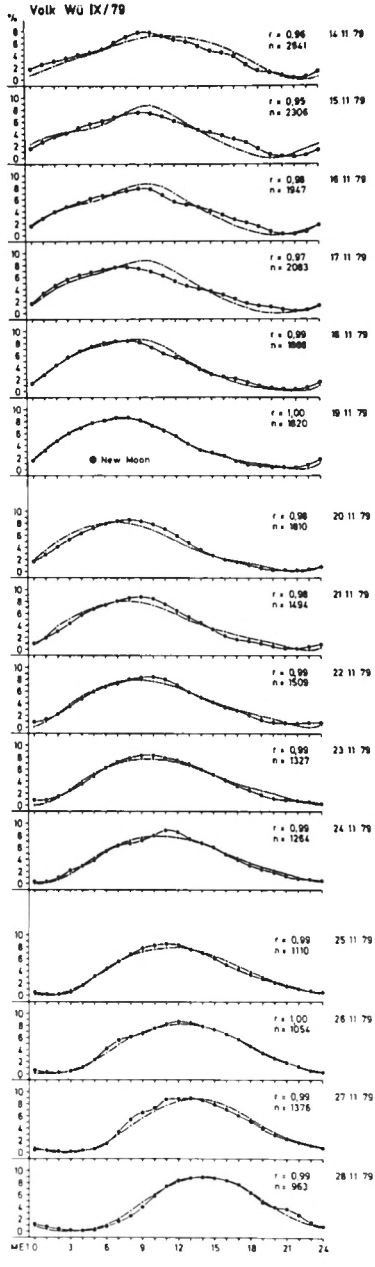


Abb. 16. Free-running: Präferenzaktivitätskurven der Bienen im gestörten EMF. Das Kollektiv der Sammelbienen verhält sich an den einzelnen Tagen homogen.

• = (geschlossene Kreise) Präferenzaktivität der Bienen;

˙ = (Punktkurve) „Ereigniskurve" berechnet aus Mond- und Sonnenkonstellation.

Bezugsraum: Mondsystem.

Transformation „in der Zeit": 14. 11. und 20.–28. 11.

Transformation „im Raum": 15. 11.–19. 11.

Bei Neumond $\tau < 24$ Std.; ab Neumond $\tau > 24$ Std.

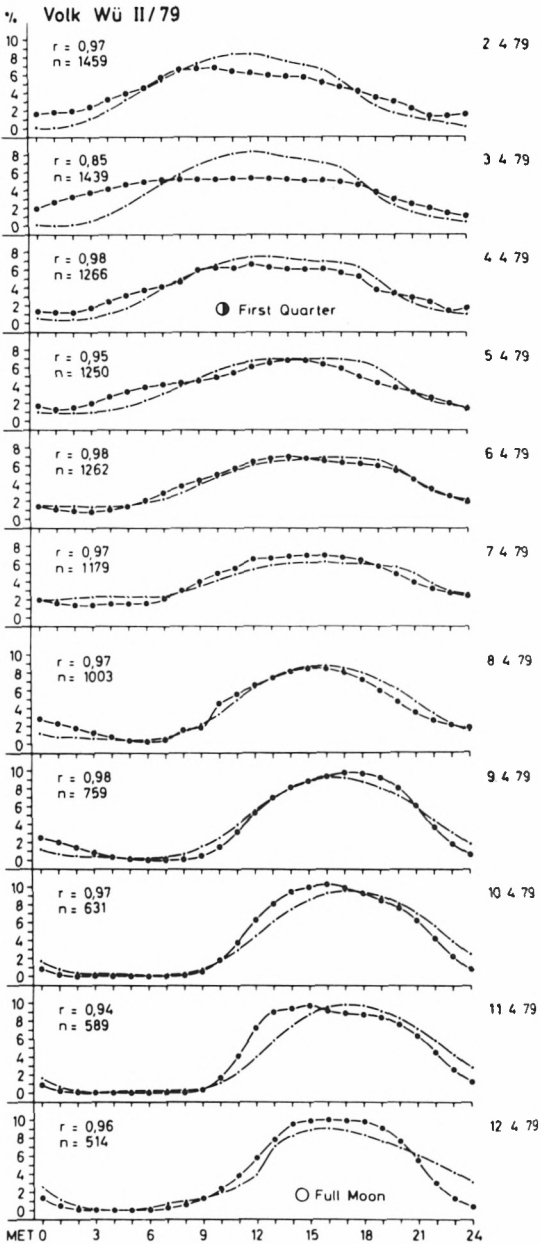


Abb. 17. Free-running: Präferenzaktivitätskurven der Bienen im gestörten EMF. Das Kollektiv der Sammelbienen ist, bezüglich des Transformationsmodus, in zwei etwa gleich große Gruppen (vom 2.–10. 4.) gespalten.
Bezugsraum: Mondsystem.
Transformation „in der Zeit" und „im Raum" vom 2.–10. 4.
Transformation „in der Zeit" am 11. und 12. 4.
Weitere Erklärung: s. Legende Abb. 16.
$\tau > 24$ Std.

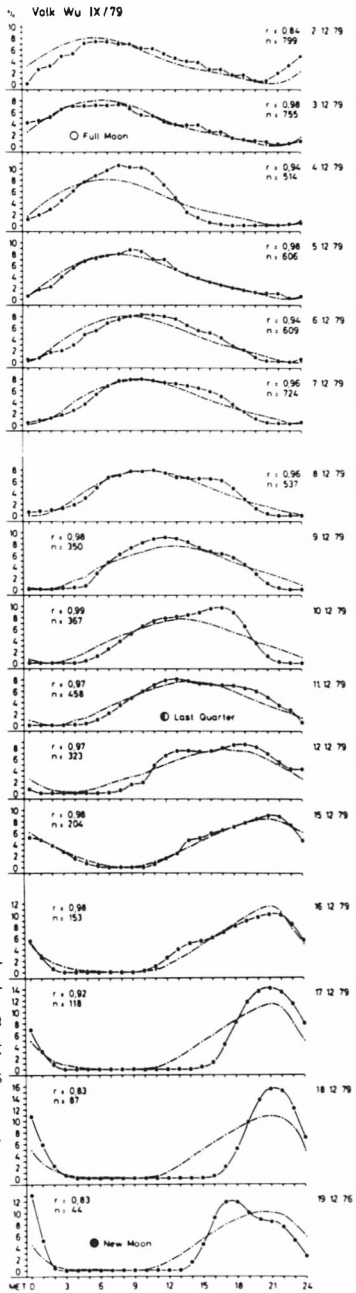


Abb. 18. Free-running: Präferenzaktivitätskurven im gestörten EMF. Das Kollektiv der Sammelbienen verhält sich an den einzelnen Tagen (Ausnahme 12. 12.) einheitlich, zeigt jedoch Wechsel sowohl im Führungsfeld als auch im Transformationsmodus.
Bezugsraum: 2.–11. 12., Mond; 12. 12., Mond und Sonne; 13.–19. 12., Sonne.
Transformation „im Raum": 2. u. 3. 12.
Transformation „in der Zeit": 4.–19. 12.
Weitere Erklärung: s. Legende Abb. 16.
$\tau > 24$ Std.

1. In der Justierung der Azimute von Sonne und Mond. Azimut 0° kann im N, O, W oder S sein. Aber nur in diesen diskreten Punkten. Es wurden keine Zwischenlagen gefunden. N und S bedeutet eine Inversion des azimutalen Gewichtungsfaktors, also eine Vorzeichenänderung. Für biologische Systeme nichts Ungewöhnliches. Die Lage W kann ebenfalls als Inversion betrachtet werden, wenn bei Azimut 0° in O sin Az durch cos Az ersetzt wird. Auch das ist in der Orientierungsphysiologie gegeben. Jedoch sind dann zumeist die Wirkungen beider Komponenten *simultan* miteinander verknüpft im Gegensatz zum hier vorliegenden Phänomen. Mit der Änderung der azimutalen Gewichtungsfaktoren (sin Az zu cos Az) ist keine Änderung der Bewertung der Höhen verbunden (s. 2.). Die Formel präsentiert sich nun auf folgende Weise:

Aktivität der Bienen / Zeiteinheit

$$= [0{,}46 \times (\cos Az\odot + \cos^2 h\odot) + (\cos Az\,☾ + \cos^2 h☾)]/\Delta t.$$

Der Wechsel von sin Az zu cos Az und vice versa führt zu scheinbarem „Zeitverlust" oder „Zeitgewinn", *wenn* τ *aus der drastischen Änderung der Präferenzaktivität berechnet wird* (τ «24 Std. bzw. τ» 24 Std.). Weder Zeit noch Raum (in unserem speziellen Fall hier) können beliebig „verschwinden" oder „zunehmen". Raum- und Zeitperiodik (Zyklus) bleiben gleich, wenn sie *neutral*, also „gewichtungsfrei" betrachtet werden. Auch nach der Transformation. *Sie sind konstant.* Was sich ändert, ob kontinuierlich oder sprunghaft (durch Funktionswechsel in diskreten Lagen), *ist allein die Zuordnung der Gewichtungsfaktoren* im Raum-Zeit-Kontinuum. Sie verlagern sich gesetzmäßig raum-zeitspezifisch und treten in den Ereigniskurven als Intensitätsänderungen in Erscheinung. D. h. eindimensionale Analyse von Ereigniskurven über der Zeit kann keine Aussage über deren Zustandekommen erbringen, da die Ursachen im Raum-Zeit-Kontinuum liegen. Auf Einzelheiten kann nicht näher eingegangen werden.

2. In der „Horizontebene" für die Höhenfestlegung. Sie entspricht in den seltensten Fällen der „natürlichen" Registrierung. Der „Horizont" (0° Höhe) kann bei 0°, 90° bzw. 270° und 180° Azimut liegen (wiederum nur in diesen diskreten Raumrichtungen). Dies hat spezifische Modulationen der Ereigniskurve zur Folge. Das Schwerefeld der Erde wird als Justierfeld für die Festlegung des „effektiven Horizontes" benützt. (Wiederum Parallele zur Mißweisung, wo dem per-

manenten EMF nur eine Funktion als Justierfeld zugewiesen ist.) Die Transformationen (Azimut und Höhe) müssen für beide Systeme *gleichsinnig* durchgeführt werden. (Bisher konnten 8 Varianten gefunden werden.)

3. Die Transformation erfolgt auf zweierlei Weise:

a) Es genügt *ein* Transformationspunkt für *einen* Tag. Das ist die 0°-Azimutlage des zu transformierenden Raumes. Sie befriedigt die statistische Aussage.

b) Es wird zu jeder Stunde, d.h. permanent über den Tag, der jeweilige Azimutwert transformiert. Die Statistik läßt keine Aussage zu, welche Version real ist. Theoretische Überlegungen weisen auf b.

Durch die Transformation erfolgt eine *Aufspaltung des zu transformierenden* Raum-Zeit-Kontinuums in Raum und Zeit. Wird nun eine Transformation vorgenommen, so kann nur jeweils ein ,,Parameter" – Raum oder Zeit – transformiert werden. Der zweite Parameter bleibt in seiner ursprünglichen ,,Periodik" erhalten, also konstant. Damit ist die Realität respektiert. (Beide Parameter simultan zu transformieren widerspricht hier der Wirklichkeit!)

Wird eine Transformation in *Raumkoordinaten* vorgenommen, dann werden *azimutal-äquivalente* Ereignisse im *gleichen Raum* registriert, aber in *unterschiedlichen Zeitebenen* als Folge der *konstant* gebliebenen *Zeitperiodik.* Der Transformationswinkel wird in *Winkelgraden* benützt. Die Raumtransformationen sind durch theoretische Überlegungen dem Verständnis leichter zugänglich als die Transformationen in der Zeit.

Bei Transformation *in der Zeit* werden als Folge der Raumkonstanz *azimutal-äquivalente* Ereignisse in *gleichen Zeitebenen,* aber in unterschiedlichen Räumen, registriert. Die Raumkoordinaten des transformierten Systems unterliegen als konstante Einheit, entsprechend dem Transformationswinkel, der hier in Δt erscheint und nicht in Winkelgraden, *einem kontinuierlichen Phasenshift* in bezug auf ihre ,,natürlichen" astronomischen Koordinaten. Dies bedeutet, vom ,,natürlichen" astronomischen Koordinatensystem aus betrachtet, daß die *azimutalen* und *höhenspezifischen* Gewichtungsfaktoren nicht *konstant,* sondern *variant* sind. Überträgt man diese Überlegungen in das vierdimensionale zylindersymmetrische System, so werden sie leichter verständlich. Bei der Raumtransformation wird *ein* konstan-

ter Raum oder „Raumperiodik" erhalten. Die „zeitperiodisch" (zyklisch) ablaufenden Ereignisse des Führungssystems und des transformierten unterscheiden sich in diesem Raum durch *zeitlichen Phasenshift*. Durch Zeittransformation liegt *eine* konstante Zeitperiode (Zyklus) vor. Die in *verschiedenen* Räumen ablaufenden *azimutal-äquivalenten* Ereignisse unterscheiden sich in diesem Zeitzyklus durch *azimutalen Phasenshift*. Nun ist statistisch nicht zu beweisen, ob eine Transformation in der Zeit vorliegt oder aber die Ereigniskurve nur eines Systems, so lange mit *rein geometrisch berechneten relativen Intensitätskurven* gearbeitet werden muß.

Distinkte Erscheinungen, verbunden mit theoretischen Überlegungen, lassen den Schluß zu, daß dieser Version der Transformation ein hoher Grad an Wahrscheinlichkeit zukommt. Die Raumtransformation steht außer Zweifel.

Die gesamte Problematik kann kurz in zwei Sätzen zusammengefaßt werden:

1. Im *nicht neutralen* Raum-Zeit-Kontinuum liegt sie im Aufspüren der Justierlagen und der davon abhängigen raum-zeitspezifischen Zuordnung der Gewichtungsfaktoren.
2. Der rezipierende Apparat korrespondiert in simultaner Resonanz mit den aus Punkt 1 sich ergebenden „Feldänderungen". Letzteres liegt bisher völlig im Dunkel.

Eine weitere Analyse der „Ereignisse", außer der hier dargelegten „rein geometrischen", kann der Biologe nicht im Alleingang durchführen. Er hat aber, wenn er *richtig* „sieht", im lebenden Organismus das feinste Meßinstrument zur Hand. Unser Dilemma steht nicht isoliert.

Es gibt in diesem Zusammenhang einige Phänomene subtiler Art. Sie sind reproduzierbar, sperren sich aber einer befriedigenden Erklärung.

Dresler (1940, zit. aus Lang 1972/73) führte simultan an zwei Versuchspersonen flimmerphotometrische Messungen während eines ganzen Jahres durch. Die Ergebnisse waren eindeutig: Die Meßwerte schwankten im Laufe des Jahres; im Sommer war das Empfindlichkeitsmaximum mehr nach dem kurzwelligen, im Winter dagegen mehr nach dem langwelligen Spektralbereich verschoben. Außerdem stellte er eine Farbempfindlichkeitsänderung während des Mondmonats fest. Das Empfindlichkeitsmaximum war zur Neumondzeit

mehr nach dem kurzwelligen, zur Vollmondzeit mehr zum langwelligen Spektralbereich verschoben. Dresler: „Wir registrieren diese Tatsache als Kuriosum und müssen es dem Physiologen überlassen, nach der Begründung zu suchen." Von Buchwald (1941, zit. aus Lang 1972/73) wurde das Ergebnis der mathematischen Analyse unterzogen und von Kohlrausch (1943, zit. aus Lang 1972/73) medizinisch überprüft. Lang selbst (1972/73) hat am Guppy mondphasenabhängige Empfindlichkeitsänderungen im violetten und gelben Spektralbereich festgestellt. Korall (in Vorbereitung) kommt überraschend bei elektrophysiologischen Ableitungen am Cervicalorgan der Honigbiene unter Berücksichtigung magnetischer Feldänderungen zu folgender Feststellung: Die Ableitungen sind entweder mit den spezifischen Magnetreizen korreliert oder aber der jeweiligen Sonne-Mond-Konstellation in ähnlicher – oft identischer – Form zugeordnet, wie dies bei den Präferenzaktivitäten der Fall ist. (Die „Justierproblematik" ist hier am festgelegten Tier noch nicht voll durchschaubar.)

Autrum (1941) hat zweifelsfrei nachgewiesen, daß das Subgenualorgan von Decticus auf minimalste Erschütterungen anspricht. Schwingungsweiten von 0,36 Å ($3{,}6 \times 10^{-9}$ cm), mit einer Frequenz von 2000 Hz geboten, werden noch rezipiert. Das ist eine kaum vorstellbare Größe, liegt sie doch in atomarer Größenordnung. (Durchmesser der ersten Elektronenbahn des H-Atoms: 1,1 Å.) Zuletzt sei auf ein Experiment in der Physik verwiesen, das erklärbar ist, aber sich in solchen Dimensionen vollzieht, die dem menschlichen Vorstellungsvermögen Grenzen setzen. Greenberger und Overhauser (1980) beschreiben unter anderem ein Experiment, in dem durch minimalste Änderungen im Gravitationspotential der Erde, erzeugt durch Heben oder Senken des „Justierhorizontes" im cm-Bereich (1–2 cm), Neutronen „schwerer" oder „leichter" werden. Die Versuche bilden den Ansatz zu einer quanten-mechanischen Theorie der Gravitation. Äußerst interessant ist für die vorliegende Problematik, daß minimalste Gravitationspotentialänderungen exakt registrierbar sind. Von dieser Erkenntnis ausgehend erscheint es, theoretisch zumindest, möglich, daß den rein geometrisch berechneten Ereigniskurven differenzierte Gravitationspotentiale aus dem „Kraftfeld" Sonne-Mond „unterlegt" sind. Dem Erdpotential kommt, wie beim Neutroneninterferometer, nur Justierfunktion zu.

Nun zurück zu den Bienen. Sie benützen beide Mechanismen: Messung in Raumkoordinaten und Messung in der Zeit. Erstaunlich genug ist schon, daß Lebewesen *aktiv* dieses System zur Orientierung im Raum-Zeit-Kontinuum benützen. Völlig überrascht ist der Biologe von der Sicherheit dieses Benützens: Meist besteht ideale Korrelation der einzelnen täglichen Aktivitätspräferenz und der aus Mond- und Sonnendaten berechneten vierdimensionalen Ereigniskurven, die in zweidimensionaler Form dargestellt sind (ohne Glättung wird sehr gute und gute Korrelation vermerkt). Ein praktisches Beispiel soll die eingangs gemachte Phänomenbeschreibung veranschaulichen:

Das Mondsystem ist Bezugsraum. Justiert ist das einheitliche System in Mond N. Gemessen wird in Raumkoordinaten. In Abb. 19 sind die notwendigen azimutalen Transformationswinkel dargestellt (die Höhen sind entsprechend zu transformieren, also „mitzunehmen"). Es ergeben sich daraus, etwa vom Neumond zum Vollmond, für den Mond eine 24,8 Std.-Periode, seine eigene, für einen Umlauf, für die Sonne aber eine 23,2 Std.-Periode, da sie im Mondtag-System gemessen wird (leicht ersichtlich an den Fixpunkten Sonne N und Mond N). Sie wandern *auseinander*. D. h. der Winkel zwischen Sonne N und Mond N vergrößert sich jeden Tag um einen bestimmten Betrag. Umgekehrt wird der Winkel zwischen Mond N und Sonne N jeden Tag um einen entsprechenden Betrag verringert. Oder anders ausgedrückt: Der Mond entfernt sich von Sonne N, und die Sonne nähert sich Mond N. Im Vollmond, wenn sich Sonne und Mond gegenüberstehen (180° Winkeldifferenz), ist der labile Zustand des Systems erreicht, wenn das Mondsystem Führungsfeld bleibt (hier erfolgt oft ein Wechsel). Bei weiterer Vergrößerung über 180° hinaus würde sich der labile Zustand verstärken. Das System wird leicht störanfällig. Deshalb erfolgt hier *in der Regel* ein Wechsel des Transformationswinkels auf die andere Seite, damit der Transformationswinkel wieder kleiner als 180° und nicht zum stationären Winkel wird. (Der Wechsel erfolgt nicht immer, und dann arbeitet das System in der gleichen Richtung *überzogen* weiter.)

Dieser Wechsel des Transformationswinkels hat Folgen. Jetzt wird der Winkel zwischen Mond N und Sonne N jeden Tag kleiner, entsprechend der Winkel zwischen Sonne N und Mond N größer. Daraus resultiert nun eine 23,2 Std.-Periodik für den Mond und eine 24,8

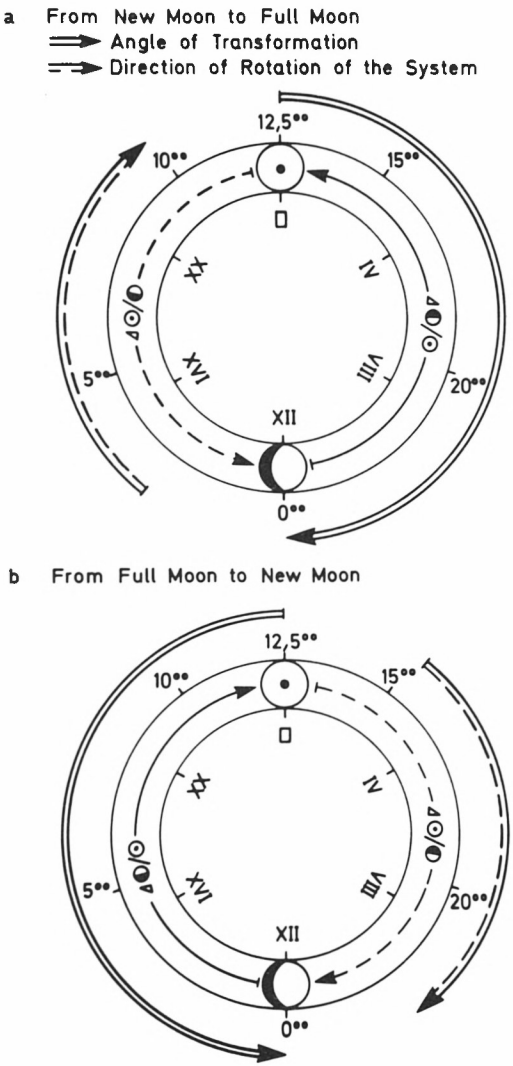


Abb. 19. Bestimmung des Transformationswinkels beim Bezugsraum „Mondsystem". Römische Ziffern = Sonnentagzeit; Zeitangabe in arabischen Zahlen = Mondtagzeit.

☉ = Sonne (in N stehend); ☾ = Mond (in N stehend).

Δ ☾/☉ = Bestimmung des Transformationswinkels im *Mondazimut* zwischen Mond N u. Sonne N.

Bei Bezugsraum „Sonnensystem" wird der Transformationswinkel zwischen Sonne N und Mond N entsprechend Δ ☉/☾ im *Sonnenazimut* berechnet

Std.-Periodik für die Sonne. Da das Mondsystem das Führungsfeld darstellt, resultiert daraus eine verkürzte, rückläufige Periodik von ca. 23 Std. bis zum Vollmond. In Abb. 16, 17 und 18 sind die entsprechenden Ereigniskurven mit den Aktivitätspräferenzen dargestellt. Das Sammelscharkollektiv verhält sich in den reinen Präferenzexperimenten *selten* einheitlich über alle Versuchstage. Die aufgezeigten Beispiele sind Ausnahmen. Es wird aufgespalten, und es erfolgt oft spontaner Wechsel in der Justierung oder im Führungsfeld. Bis zu vier Varianten sind schon in einem Kollektiv nachgewiesen worden. Gründe dafür können noch nicht angeführt werden. Aber alles weist darauf hin, daß eine – zumindest weitgehend – individuelle Entscheidung vorliegt, welche Variante in dieser extremen Situation benützt wird. Gestützt wird diese Aussage durch die Tatsache, daß schon zwei Bienen ideal korrelierte Kurven liefern.

Somit wurde mit Hilfe der Präferenzaktivitäten im gestörten EMF ein weiterer free-running-Mechanismus gefunden, der durch die Verknüpfung von *Raum* und *Zeit* zu *einem Ganzen* von außen gesteuert wird.

Ist dies alles? Rufen wir uns nochmals alle zuvor erwähnten „Aktivitätsperioden" des „Zeitsinns" ins Gedächtnis, die nicht erklärt werden konnten. Dazufügen kann man noch einschlägige Arbeiten aus der Literatur. Alle diese unerledigten Fälle sind nun einer griffigen Erklärung zugänglich. Die Bienen orientieren sich in diesen periodischen Aktivitätskurven nach *Ereigniskurven aus dem Raum-Zeit-Kontinuum.*

Eine Auflistung der Fakten soll genügen:

1. Wie abgehandelt: Präferenzen im gestörten EMF.
2. Zeitsinnversuche während magnetischer Störungen, gleichgültig welchen Ursprungs diese Störungen sind.
3. Versetzungsversuche in der geographischen Breite, sowohl mit Normalbienen als auch mit Transplantaten durchgeführt.
4. Zeitsinnversuche, in denen die Bienen durch Kühlung auf 4–5°C (plus) über einige Stunden (ca. 5 Std.) einen „Gedächtnisverlust" erleiden. Versuche von M. Renner und eigene.
5. Die Ergebnisse aus Zeitsinnversuchen, die durch Phasenverschiebung („Zeitversetzung") erhalten wurden (Beier, 1968)
6. Phasenverschiebung („Zeitversetzung") verursacht durch CO_2-Narkose (Medugorac, 1968).

7. Zeitsinnversuche mit längeren oder kürzeren Fütterungsintervallen als 24 Std. (Beling, 1929; Beier, 1968).
8. Wahrscheinlich ist auch der soziale Zeitgeber, wie ihn Medugorac und Lindauer (1967) beschreiben, diesem Mechanismus unterworfen. Endgültige Klärung steht noch aus.
9. Transplantationsversuche mit non-sense Information oder im gestörten Magnetfeld während der Spenderdressurzeit oder beim Test der Wirte.

Im Gegensatz zu den Aktivitäten der reinen Präferenzen ist in allen anderen aufgeführten Fällen die Entscheidung des Kollektivs Sammelschar meist eindeutig in der Benützung einer der 8 Varianten. Erfolgt eine Aufspaltung, dann nur in 2 Varianten, die sich am geringsten unterscheiden.

Hier können wir den Grund nachweisen. Die Fütterungszeit setzt den *Auslöser* für die Justierung. Es wird immer die Justierung gewählt, die *das Maximum der Aktivität* möglichst nahe bei der Futterzeit garantiert.

Rückschlüsse lassen sich auf den „Zeitsinn" folgern. Die Toleranz im magnetischen Intensitätsbereich scheint sehr gering zu sein. Wird die Toleranzgrenze überschritten, dann kann der Magnetmechanismus nicht mehr arbeiten. Es wird als letzte Orientierungsmöglichkeit in *Raum* und *Zeit* auf den beschriebenen „Relativitätsmechanismus" gewechselt.

Es bleibt im „Zeitsinn" und bei der Rhythmik der Bienen nichts mehr, was sich einer Erklärung entzieht. Ist dies die Masterclock? Man kann es so sehen; aber es ist eine Masterclock, die rein exogener Natur ist. Endogen bleibt die erstaunliche Fähigkeit, die Sensibilität dafür zu besitzen.

Eine Schlußbemerkung sei noch erlaubt. Ausgangspunkt der Analyse waren immer die *einzelnen* Versuchsergebnisse, die für sich allein mit physikalischen und astronomischen „Daten" verglichen und so in Beziehung zueinander gesetzt wurden, auch wenn wir noch nicht überall zur vollen Einsicht gelangt sind, wie der letzte Teil ausweist.

Mit dieser Methode läßt sich dennoch sehr gut arbeiten, wie wir hoffentlich anschaulich zeigen konnten.

Die Ergebnisse mit sich selbst vergleichen und nach optimalen mathematischen Beschreibungen zu suchen, wie es zumeist auf diesem Gebiet geschieht, liegt uns fern, da eine Grundvoraussetzung für ein solches Tun fehlt: die absolute Konstanz der Dinge.

Danksagung

Wir möchten nicht versäumen, für vielfältige praktische Unterstützung, die wir erfahren haben und auch weiterhin in Anspruch nehmen müssen, zu danken. Ohne sie wäre die Arbeit nicht durchführbar.

Wir danken dem Geodätischen Institut der TU in Darmstadt, dem Astronomischen Institut der Universität Würzburg, dem Rechenzentrum der Universität Würzburg und den Geophysikalischen Instituten in Fürstenfeldbruck (Universität München) und in Kiruna (Schweden/Universität Umeå).

Großen Dank schulden wir Frau Dr. A. Müller-Haeckel und Prof. Dr. K. Müller, Universität Umeå (Schweden), die uns die Versetzungsversuche in angenehmer Weise erleichterten.

Besonders wichtig war und ist die positive kritische Diskussion mit Kollegen in Momenten des Zweifels, die nicht selten sind. Hier schulden wir besonderen Dank Prof. Dr. K. Müller für die permanenten „Reisegespräche" während der Aufenthalte in Schweden und bei Besuchen in Deutschland, Herrn Prof. Dr. F. Huber für die Anregungen und die kritische Durchleuchtung der Problematik in den „weihnachtlichen" Gesprächen und nicht zuletzt Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. H. Autrum für sein Verständnis, die Kritik und sein drängendes Interesse am Fortgang der Arbeit. Er ist der Initiator dieser Ausführungen, zu diesem Zeitpunkt und in dieser Form. Ohne sein Mitwirken wäre dies nicht möglich gewesen. Für all seine Mühe danken wir herzlich.

Die Arbeit wurde finanziell unterstützt von der DFG, der Mainzer Akademie der Wissenschaften und der Literatur und aus Sondermitteln der Universität Würzburg.

Literaturverzeichnis

Autrum, H.: Über Gehör und Erschütterungssinn bei Locustiden. Z. vergl. Physiol. *28,* 580–637 (1941)

Beier, W.: Beeinflussung der inneren Uhr der Bienen durch Phasenverschiebung des Licht-Dunkel-Zeitgebers. Z. f. Bienenforschung *8,* 355–378 (1968)

Beling, I.: Über das Zeitgedächtnis der Bienen. Z. vergl. Physiol. *9,* 259–338 (1929)

Buchwald, E.: Korrelation zwischen spektraler Hellempfindlichkeit und Mondphase. Physik. Z. *42,* 378–381 (1941)

Dresler, A.: Über eine jahreszeitliche Schwankung der spektralen Hellempfindlichkeit. Das Licht *10,* 79–82 (1940)

Frisch, K. v.: Tanzsprache und Orientierung der Bienen. Springer 1965

Greenberger, D. M. and *A. W. Overhauser:* The Role of Gravity in Quantum Theory. Scientific American, Vol. 242/5 May 1980

Kohlrausch, A.: Periodische Änderungen des Farbensehens. Film und Farbe *9,* 98–102 (1943)

Lang, H.-J.: Untersuchungen zur Tages-, Monats- und Jahresperiodik der Lichtempfindlichkeit beim Guppy (Lebistes reticulatus). Habilitationsschrift der Georg-August-Universität zu Göttingen, Wintersemester 1972/73

Martin, H. und *M. Lindauer:* Der Einfluß des Erdmagnetfeldes auf die Schwereorientierung der Honigbiene (Apis mellifica) J. Comp. Physiol. *122,* 145–187 (1977)

Medugorac, I.: Der Zeitsinn der Honigbiene unter dem Einfluß von CO_2 Narkose. Zugleich ein Beitrag zur Frage sozialer Zeitgeber. Inaugural-Dissertation der naturwissenschaftlichen Fakultät der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt/Main, 1968

Medugorac, I. und *M. Lindauer:* Das Zeitgedächtnis der Bienen unter dem Einfluß von Narkose und von sozialen Zeitgebern. Z. vergl. Physiol. *55,* 450–474 (1967)

Renner, M.: Neue Versuche über den Zeitsinn der Honigbiene. Z. vergl. Physiol. *40,* 127–158 (1957)

Wahl, O.: Neue Untersuchungen über das Zeitgedächtnis der Bienen. Z. vergl. Physiol. *24,* 529–589 (1932)