UNIVERSITÄT KOBLENZ · LANDAU

[agbi] Institut für Mathematik
Arbeitsgruppe
Bildungsinformatik



Hermann Stever, Jochen Kuhn, Christoph Otten, Bernd Wunder, Wolfgang Harst

Verhaltensänderung unter elektromagnetischer Exposition

Pilotstudie 2005

http://agbi.uni-landau.de/

Inhalt

Zusammenfassung 3

Einleitung 4

Informationstheoretisch-physikalische Grundlagen

Ein formales Einwirkungsmodell der Bildungsinformatik 5

Physikalisch-technische Designdetails 10

Empirie

Versuchsbeschreibung 15

Auswertung.....18

Ausblick.....21

Literatur 22

Autorenverzeichnis.....24

Zusammenfassung

Die Pilotstudie beschäftigt sich mit Verhaltensänderungen von Honigbienen durch elektromagnetische Exposition. Nach Darstellung eines bildungsinformatischen Modells und der physikalisch-technischen Hintergründe wird der Aufbau der jeweiligen Versuchsdesigns beschrieben.

Mehrere Völker *Apis mellifera carnica* wurden kontinuierlich der Strahlung von DECT-Basisstationen ausgesetzt, vergleichbare Völker wurden als Kontrollgruppe am selben Standort untersucht. Für beide Gruppen wurden die Parameter Baufläche, Wabengewicht und Rückkehrverhalten erhoben.

Aufgrund des Charakters einer explorativen Studie werden lediglich einige Ergebnisse exemplarisch dargestellt, wobei v.a. die Beobachtungen zum Rückkehrverhalten auf vertieften Forschungsbedarf hinweisen. Schließlich werden weitere mögliche Versuchsanordnungen und Untersuchungsdesigns aufgezeigt.

Einleitung

Die modernen Medien und ihr Einsatz im Bildungswesen sind originäre Forschungsfelder der Bildungsinformatik [Stever 1996]. Diese Aktivitäten bedingen eine zunehmende öffentliche Debatte über mögliche Nebenwirkungen dieser Medien, z. B. in Form elektromagnetischer Felder und ihrer Auswirkungen auf die menschlichen Gehirnstrukturen (Schlagwort: Elektrosmog!). Obwohl in den letzten Jahren vermehrt wissenschaftliche Studien initiiert wurden, die die Einwirkung der Hochfrequenzenstrahlung auf lebende Organismen und Zellen untersuchten, fehlen bis heute adäquate Einwirkungsmodelle, mit denen die verschiedenen Effekte, insbesondere im nichtthermischen Bereich, wie z. B. resonante Erregung lebender Organismen, erklärt werden können.
Naturgemäß verbietet sich in diesem Bereich ein Experimentieren am Menschen. Es gilt also, geeignete Bioindikatoren ausfindig zu machen, und daraus entsprechende Erklärungsmodelle für die Einwirkung von elektromagnetischen hochfrequenten Feldern auf den Menschen, insbesondere seine Gehirnstrukturen, zu entwickeln.
Wie bereits unter der Thematik „Theorie der Superzeichen im Rahmen der Bildungsinformatik" [Stever 2002] ausgeführt, gibt es seit 1993 Untersuchungsergebnisse, die erkennen lassen, dass der Wechsel der Tätigkeiten der Bienen einhergeht mit Veränderungen in bestimmten Hirnregionen, insbesondere solchen der sogenannten Pilzkörper [Withers u.a. 1993].
Dazu kommt, dass nach Menzel [Menzel 1993] die assoziative Gehirnstruktur der Bienen der des Menschen sehr ähnelt. Das Bienengedächtnis durchläuft sequentielle Phasen, die sich hinsichtlich ihrer Störanfälligkeit und der Beteiligung verschiedener Regionen im Gehirn unterscheiden.
Zusammenfassend zeigen diese Ergebnisse, dass sich Honigbienen ausgezeichnet für Studien eignen, die zur Aufklärung der neuronalen Grundlagen des Lernens und des Gedächtnisses dienen. Damit bieten sich Bienenvölker unter geeignet zu konstruierenden Voraussetzungen als Bioindikatoren zur Untersuchung der Einwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den Menschen an, zumal die körperlichen Ausmaße der Bienen im Bereich der resonanten Erregbarkeiten bei Mobilfunkfrequenzen liegen.
Aus entsprechenden Beobachtungen bei Bienenvölkern mag es später gelingen, adäquate theoriegeleitete Erklärungsmodelle für die Einwirkung von elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern auf den Menschen zu entwickeln.

Ein formales Einwirkungsmodell der Bildungsinformatik

Ein Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe Bildungsinformatik der Universität in Landau besteht in der Analyse des Zusammenwirkens von wissensbasierten Systemen und menschlichen Experten zur Entwicklung computergestützter Problemlösungsverfahren in ausgewählten Einzelwissenschaften. Ziel ist die optimale Gestaltung der Schnittstelle zwischen auf regelbasiertem Wissen gegründeter technischer Intelligenz und der menschlichen Intelligenz mit ihren assoziativen Fähigkeiten. Diese ist bekanntlich insbesondere durch spontane Intuition und Überschreitung des bewussten Wahrnehmungsraumes gekennzeichnet. Eine Auseinandersetzung mit Fragen der Messbarkeit oder Bewertung von Information ist ein „Dauerbrenner" jeder informatikorientierten Forschung, insbesondere aber der Bildungsinformatik.
In der historischen Entwicklung steht der nachrichtentechnische Aspekt einer Aufwandsminimierung bei Nachrichtenübertragungsprozessen im Zentrum der mathematischen Informationstheorie. Es wird stets der „Preis", der zur Erkennung gesendeter Zeichen „bezahlt" werden muss, mit einem Maß für die Information verbunden. Dagegen ist der semantische Aspekt, bei dem Information als subjektive Größe nach dem Wert zu bestimmen ist, mit dem sie zweckmäßige Entscheidungen ermöglicht, bisher wenig formal entwickelt, obwohl gerade angesichts der zunehmenden Verbreitung entscheidungsunterstützender Systeme aktueller Bedarf besteht. Bei diesen Systemen werden Darstellungen von elementaren Tatbeständen und Sachverhalten - nach logischen Regeln und durch fachliche Kriterien gesteuert - zu komplexen Informationen verarbeitet, die von Benutzern des Systems zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. In diesem Zusammenhang ist es mit Ganzhorn möglich, „Information als subjektive Größe, nämlich als Wissenszuwachs eines Menschen (zu) verstehen" [Ganzhorn 1986].
In einer früheren Arbeit [Stever 2002] haben wir in Anschluss an die qualitativen und strukturellen Zusammenhänge dieser Auffassung von Information ein geeignet konstruiertes Informationsmaß abgeleitet.

Wir gehen im Folgenden für eine erweiterte Theorie der Bildung von Superzeichen von ergänzenden Annahmen aus:
Gegeben sei eine nichtleere Menge $\hat{W}$ von Darstellungen von Wissenselementen.
N_n bezeichne den Anfangsabschnitt der natürlichen Zahlen N. Wenn

$$Ŧ(\hat{W}) = \bigcup_{n \in N} \{ f: N_n \rightarrow \hat{W} \}$$

die Menge aller endlichen Verknüpfungsfolgen mit Elementen aus $\hat{W}$ bezeichnet, dann lässt sich durch den rekursiven Prozess der Superzeichenbildung

$$Ŧ^0(\hat{W}) = \hat{W}$$

$$Ŧ^n(\hat{W}) = Ŧ(Ŧ^{n-1}(\hat{W}))$$

eine Wissenshierarchie

$$W(\hat{W}) = \bigcup_{i=0}^{n} Ŧ^i(\hat{W})$$

definieren. Einzelheiten zur Konstruktion und zum induzierten Maß für die subjektive Information der Elemente der Wissenshierarchie sind in [Stever 2002] ausgeführt.

Es ist nahe liegend, im Zusammenhang mit dem rekursiven Aufbau einer Wissenshierarchie die Selbstbezüglichkeit dieses Prozesses auszudeuten. Wissenserwerb wird formal als ein dynamischer Prozess aufgefasst, der gegebenenfalls auf einem stabilen und einem chaotischen Bereich beschreibbar ist. „Kreativität" entspricht dem „Chaos" in dem Sinne, dass wir nicht beschreiben können, wie die Vorhersagen über längere Zeiträume zu tätigen sind. Dagegen findet „algorithmisierbares Lernen" in dem stabilen Bereich statt.
Für die Zwecke dieses Projektes wird die oben dargestellte Theorie der Superzeichen und insbesondere die darin involvierte Repertoireveränderung in dem Sinne weiterentwickelt, dass die Möglichkeit physikalischer Einflüsse der Außenwelt auf den Prozess der Superzeichenbildung in die Modellannahmen aufgenommen wird.

Modellmodifikation

Nach allgemeiner Grundannahme der kybernetikbasierten Lerntheorie wird Lernen abstrakt als Aufbau eines internen Modells definiert. Einen Sachverhalt zu wissen, zu kennen oder zu verstehen bedeutet also, dass ein lernendes Subjekt ein internes Modell von diesem Sachverhalt aufgebaut hat. Wissen entsteht andererseits nach dem gleichen Grundansatz aus der Informationsverarbeitung in der durch den Superierungsprozess beschriebenen Weise. Die aktuell entwickelten Theorien von künstli-

chen neuronalen Netzwerken (als Modell des Gehirns) gestatten zusammenfassend die Auffassung einer internen Repräsentanz der Wissensstruktur, die durch physiologische Gegebenheiten im Gehirn widergespiegelt wird.

Um diese Vorstellungen in den Rahmen unserer formalen Ableitungen einzubetten, ist es nötig, den oben definierten Begriff der Wissenshierarchie

$$W(\hat{W}) = \bigcup_{i=0}^{n} \mathfrak{T}^i(\hat{W})$$

zu einer Darstellung der Wissensstruktur geeignet zu erweitern:

Wir setzen wiederum voraus, dass das zu erlernende Wissen aus einer endlichen, nichtleeren Menge $\hat{W}$ von Wissenselementen (bzw. Darstellungen davon) besteht, wobei zwischen den Elementen dieser Menge gewisse Zusammenhänge bestehen. Diese Zusammenhänge können z. B. sachlogische oder syntaktische Abhängigkeiten der Strukturelemente sein. Solche Zusammenhänge lassen sich allgemein als Relationen auffassen oder als Morphismen darstellen. Im Folgenden bezeichne

$\hat{W} = \{w_i \mid i \in I\}$ für eine endliche, nichtleere Indexmenge I die Menge der Wissenselemente. Weiter seien für $i_1 \in I$ und $i_2 \in I$ die Elemente w_{i_1} und w_{i_2} beliebig aus $\hat{W}$, und es bezeichnet

$$M_{i_1,i_2} = M(w_{i_1,i_2}) = \left\{ m_{i_1,i_2} \mid m_{i_1,i_2} : \begin{cases} \hat{W} \rightarrow \hat{W} \\ w_{i_1} \rightarrow w_{i_2} = m_{i_1,i_2}(w_{i_1}) \end{cases} \right\}$$

die (evtl. leere) Menge der Morphismen von $\hat{W}$ nach $\hat{W}$, die die Abhängigkeiten zwischen den Wissenselementen w_{i_1} und w_{i_2} kennzeichnen.

Eine „Darstellung der Wissensstruktur" ergibt sich, indem alle möglichen Morphismen zwischen den Elementen von $\hat{W}$ vereinigt werden zur Menge

$$M(\hat{W}) = \bigcup_{i,j \in I} M(w_i, w_j)$$

Eine Wissensrepräsentanz, aufgefasst als Aufbau eines internen Modells des zu erlernenden Sachverhaltes, lässt sich also mit der hier angegebenen Begriffsbildung formal als Paar $(\hat{W}, M(\hat{W}))$ kennzeichnen und als Graph der Wissensstruktur interpretieren.

Der Aufbau einer Wissenshierarchie und eine Berechnung der subjektiven Information sind in Analogie und sinnvoller Übertragung der oben dargestellten Vorgehens-

weise möglich. Allerdings ist dabei die Möglichkeit physikalischer Einflüsse der Außenwelt auf den Prozess der Superzeichenbildung in die Modellannahmen noch nicht aufgenommen. Dies lässt sich mit der Zusatzannahme erreichen, dass physikalische Einflüsse den Superierungsprozess verändern können. Es gilt also in die mathematische Beschreibung des Superierungprozesses zusätzliche Parameter zu integrieren. Die Menge aller endlichen Verknüpfungsfolgen mit Elementen aus $\hat{W}$

$$\mathfrak{F}(\hat{W}) = \bigcup_{n \in N} \{ f: N_n \rightarrow \hat{W} \}$$

ist zu ersetzen durch eine Menge aller endlichen Wege durch den Graphen der Wissenstruktur

$$\mathfrak{F}_p(M(\hat{W})) = \bigcup_{n \in N} \{ f_p: N_n \rightarrow (\Pi, \hat{W}, M(\hat{W})) \},$$

bei der Π für eine Menge möglicher physikalischer Einflüsse steht. Für jedes
feste $p \in \Pi$ ist damit über einen zu dem oben skizzierten Aufbau analogen formalen Vorgehen die optimale Repräsentation der Wissenselemente und damit ein internes Modell eines Sachverhaltes zu ermitteln. Die für die empirischen Untersuchungen dieses Projektes relevanten Parameter $p \in \Pi$ werden im folgenden Abschnitt bestimmt. Eine Bewertung der subjektiven Information geschieht dabei über dem Repertoire der Menge der möglichen Wege. Für ein gegebenes $n \in \mathbb{N}$ werden die Wege der Länge (n-1) bis 1 in dem Graphen bzw. über die entsprechend definierten Teilgraphen berücksichtigt.
Für eine Evaluation dieses Modells war es Ziel dieses Projektes zu untersuchen, ob physikalische Einflüsse den Superierungsprozess selbst verändern. Über die möglichen Parameter $p \in \Pi$ sind die Art und Weise, wie physikalische Einflüsse in den Superierungsprozess eingreifen, abbildbar.
Wie bereits einleitend skizziert, dienen als Einstieg zur Bestimmung eines möglichen Bioindikators zur experimental-physikalischen Interpretation des Modells in diesem Projekt neuere Untersuchungen über Lernprozesse bei Bienen. Nach unserem Modell wird die Tätigkeit der Bienen durch ihr Wissen über die Umwelt bestimmt, von dem wir annehmen, dass es durch Informationsverarbeitung in der durch den Superierungsprozess beschriebenen Weise entsteht. Wie einleitend bereits dargestellt, wird diese Auffassung durch neurobiologische Untersuchungsergebnisse gestützt, die erkennen lassen, dass der Wechsel der Tätigkeiten der Bienen einhergeht mit Verände-

rungen in bestimmten Hirnregionen, insbesondere solchen der so genannten Pilzkörper [Withers u. a. 1993; Faber & Menzel 2001]. Diese wollen wir hier als Repräsentationen interner Modelle von Ausschnitten der Umwelt als Ergebnis von Lernprozessen der Bienen ansehen.

In dem von uns untersuchten Kontext liegt es also nahe, Bienenvölker in ihrem Verhalten zu beobachten, wenn sie unterschiedlichen elektromagnetischen Expositionen ausgesetzt sind. Hier können thermische wie nichtthermische Wirkungen untersucht werden, für die noch keine Einwirkmechanismen bekannt sind. Eine frühere explorative Studie über Einwirkungen niederfrequenter und hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Bienenvölker liefert dazu erste Beobachtungen und Erkenntnisse [Kuhn & Stever 2002], die sich im Sinne der dargestellten Modellvariante einer „Erweiterten Theorie der Superzeichen" interpretieren lassen.

Wenn und soweit die körperlichen Ausmaße der Bienen im Bereich der resonanten Erregbarkeiten bei Mobilfunkfrequenzen liegen, bieten sich Bienenvölker nach dieser erweiterten Theorie der Superzeichenbildung unter geeignet zu konstruierenden Voraussetzungen als Bioindikatoren zur Untersuchung der elektromagnetischen Expositionswirkungen auf den Menschen an. Dies gilt jedenfalls, soweit es um die Untersuchung der Bildung von Ganzheiten der Wissensdarstellung oder der Wissensstrukturen als interne Modelle von Ausschnitten der Umwelt geht. Diese Fragestellungen reichen weit über den ursprünglichen Ansatz der Superzeichentheorie hinaus. Sie belegen aber gleichzeitig, dass mit dieser Theorie ein zentrales Forschungsfeld markiert wurde, das die Querschnittdimension der Bildungsinformatik deutlich hervorhebt und dabei eine zeitnahe Problemlage ergebnisorientiert erforscht.

Physikalisch-technische Designdetails zur Untersuchung der Beeinflussung des Verhaltens durch elektromagnetische Exposition

In den letzten Jahrzehnten rückten die verschiedensten Einwirkungen unserer technisierten Umwelt auf lebende Organismen mehr und mehr in den Mittelpunkt öffentlicher Auseinandersetzungen. Es wird deutlich, dass die rasante technische Entwicklung neben vielen positiven Aspekten auch negative – ja sogar gesundheitsschädliche – Folgen mit sich bringt. Neben toxischen Gefahren verschiedener Stoffe werden beispielsweise die Schädigungen durch ionisierende, radioaktive Strahlen und auch die Indizien für gesundheitsgefährdende Wirkungen nicht-ionisierender Strahlung diskutiert. Letzteres Phänomen wird teilweise auch als ‚Elektrosmog' bezeichnet.
In diesem Bereich ist es dringend erforderlich, zwischen niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern sowie hochfrequenten elektromagnetischen Feldern zu unterscheiden, da die ‚Feldtypen' verschiedene Eigenschaften aufweisen und deshalb auch auf völlig verschiedene Arten und Weisen auf Lebewesen einwirken. Während im niederfrequenten Bereich elektrische und magnetische Wechselfelder und deren Einwirkung auf lebende Organismen getrennt voneinander betrachtet werden können, sind im hochfrequenten Fall beide Felder als elektromagnetisches Feld zusammen zu betrachten. Dabei müssen im letzteren Fall thermische von nicht-thermischen Einflüssen auf Lebewesen unterschieden werden.
Während für den niederfrequenten Fall sowie für die thermischen Einflüsse im hochfrequenten Bereich bereits umfangreiche Untersuchungen mit Bienen durchgeführt wurden [Kuhn & Stever 1999a; Kuhn & Stever 1999b; Kuhn 2002], fehlen solche Studien für den nicht-thermischen Bereich. Deshalb konzentrieren wir uns in dieser Untersuchung hauptsächlich auf die resonante Erregung als mögliche nicht-thermische Einwirkung elektromagnetischer Strahlung auf lebende Organismen.

Physikalischer Hintergrund
Elektromagnetische Felder breiten sich in Zeit und Raum periodisch aus. Treffen sie auf lebende Organismen, so erzeugen sie Einwirkungen auf molekularer Ebene, da im Gewebe und den Zellen geladene Teilchen zu finden sind. Diese Teilchen nehmen elektromagnetische Energie aus dem elektromagnetischen Feld auf und wandeln diese in Bewegungsenergie um. Durch ihre Bewegung stoßen die geladenen Teilchen mit anderen Teilchen in ihrer Umgebung zusammen, sodass eine Impulsübertragung innerhalb lebender Organismen stattfindet. Durch die Teilchenbewegung und die dadurch entstehende Impulsübertragung wird die Bewegungsenergie der Teilchen durch Reibungsprozesse in Wärmeenergie umgewandelt.
Dieser Prozess hängt sowohl von der Frequenz f des den Organismus erregenden elektromagnetischen Feldes als auch von den elektrischen Eigenschaften des Organismus selbst ab. Die elektrischen Eigenschaften von biologischem Gewebe werden in diesem Fall v.a. durch seine elektrische Leitfähigkeit κ und seine Dielektrizitätskonstante ε bestimmt. Diese Parameter hängen wiederum selbst von der Frequenz des elektromagnetischen Feldes ab. Während die elektrische Leitfähigkeit bei zunehmender Frequenz ansteigt, verhält sich die Dielektrizitätskonstante reziprok: Sie fällt, wenn die Frequenz größer wird. Der Zusammenhang zwischen der Frequenz des elektromagnetischen Feldes und der elektrischen Leitfähigkeit des biologischen Gewebes bzw. seiner Dieletrizitätskonstanten wird Relaxation genannt. Das Phänomen kann am Besten durch den Energieaustausch zwischen dem elektromagnetischen Feld und polarer Wassermoleküle, wie z.B. Wasserdipole, erklärt werden. Die Dipole werden durch das sich ständig periodisch ändernde elektrische Feld gedreht, wobei sie sich bis zu einer Frequenz $f = 1$ GHz entsprechend der Richtung und Feldstärke des Feldes orientieren (vgl. Abb. 1). Dabei bestimmt der Betrag der Feldstärke, wie weit die Dipolrotationsachse der Frequenz folgt. Bei diesem Prozess nehmen die Dipole Energie aus dem elektromagnetischen Feld auf. Dreht sich die Feldrichtung um, richten sich die Dipole ebenso entgegengesetzt aus. Die aus dem Feld aufgenommene Energie wird somit in Bewegungsenergie umgewandelt. Durch Reibung entsteht bei diesem Prozess Wärmeenergie. Die charakteristische Zeit dieses Prozesses heißt Relaxationszeit τ. Sie beträgt bei großen Molekülen (z.B. bei Protei-

nen) ca. eine Mikrosekunde, bei kleinen Molekülen (z.B. Wasser) weniger als eine Nanosekunde.
Diese Umwandlung von elektromagnetischer Energie in Wärmeenergie ist sehr effizient, wenn die Feldrichtung umgedreht wird, nachdem die Dipole ihre maximale Orientierung erreicht hatten. Danach gilt für die optimale Relaxationsfrequenz f_τ bei Wechselfeldern:

$$f_\tau = \frac{1}{\tau}.$$

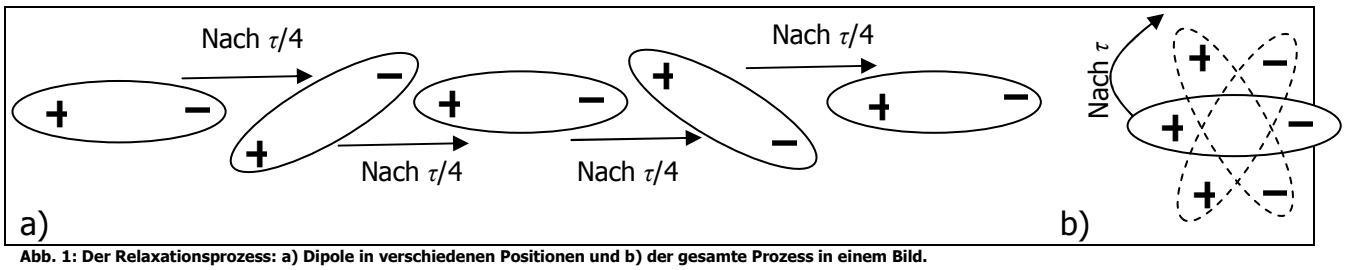


Abb. 1: Der Relaxationsprozess: a) Dipole in verschiedenen Positionen und b) der gesamte Prozess in einem Bild.

Die Relaxationsfrequenz von wässrig gelösten Proteinmolekülen liegt zwischen 1 MHz und mehreren GHz. Bei größeren Frequenzen nimmt der Grad der Dipolorientierung ab. Dieser Zusammenhang wird durch die Debye-Gleichungen beschrieben:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2}$$

$$\kappa = \kappa_0 + \frac{\left(\kappa_\infty - \kappa_0\right) \cdot \left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2}.$$

Thermische Einwirkung:
Die thermische Einwirkung kann bezogen auf die physikalische Einwirkungen am Einfachsten erklärt werden. Diese Einwirkung beschreibt die Umwandlung von elektromagnetischer Energie in Wärmeenergie. Diese Wärmeenergie wird durch die Relaxation der Dipol-Molekülrotation verursacht. In diesem Fall ist die Feldstärke groß genug, um eine maximale Dipolorientierung zu erzeugen. Die Dipole rufen dann Reibungswärme hervor, sobald ihre Ausrichtung durch die Richtungsänderung des elektromagnetischen Feldes umgedreht wird. Dieser Effekt hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. von der Frequenz des Feldes, von der Feldstärke, von der Körpermasse, von der Körperstruktur und von der Einwirkungsdauer.
Nicht-thermische Einwirkung:
Es ist unbestritten, dass hochfrequente elektromagnetische Felder Effekte hervorrufen, die nicht durch thermische Einwirkungen erklärt werden können. Deshalb geht es bei der Diskussion um die nicht-thermischen Einwirkungen hochfrequenter Strahlung nicht um deren Existenz an sich, sondern vielmehr um die Frage, ob und unter welchen Bedingungen diese Einwirkungen biologisch relevant werden können.
Aus physikalischer Sicht ist es offensichtlich, dass zunächst nur solche hochfrequenten Effekte diskutiert werden, die das thermische Rauschen nicht überdeckt. Die Energie des thermischen Rauschens beträgt etwa 25 Millielektronenvolt (meV). Eine Einwirkung mit geringerer Energie würde biologisches Gewebe nicht registrieren. Diese Grenzenergie gilt aber nur für solches Gewebe, das nicht resonant erregt wird, und nur für solche Felder, deren Frequenz nicht im Bereich der Resonanzfrequenz des biologischen Gewebes liegt. Ist Gewebe resonant erregbar und liegt die Strahlungsfrequenz im Bereich der Resonanzfrequenz dieses Gewebes, so können biologische Effekte durch elektromagnetische Felder hervorgerufen werden, deren

Energie viel kleiner als 25 meV ist. Somit stellt die resonante Erregung eine mögliche nicht-thermische Einwirkung dar, die im Folgenden erklärt werden soll.
Wird ein schwingungsfähiges Objekt, ein Schwinger bzw. Resonator, - wie z.B. ein Proteinmolekül - einmal ausgelenkt und dann sich selbst überlassen, so führt es freie Schwingungen (Eigenschwingungen) durch. Die Schwingungsfrequenz des Resonators hängt dabei nur von seinen Eigenschaften ab. Diese Frequenz heißt Eigenfrequenz f_0 des schwingungsfähigen Objektes. Wird der Resonator nun durch Energiezufuhr von einer externen Energiequelle angeregt, so folgt er den Schwingungen dieses Erregers. Er führt erzwungene Schwingungen mit der Frequenz des Erregers, der Erregerfrequenz f_E, durch. Liegt die Erregerfrequenz im Bereich der Eigenfrequenz des Resonators ($f_E \approx f_0$), so erreicht die Schwingungsamplitude des Resonators ihr Maximum. Dieses Phänomen wird als Resonanz bezeichnet. Im Falle der Resonanz entspricht also die Frequenz dieser Schwingung, die Resonanzfrequenz f_R, sowohl der Erregerfrequenz f_E der externen Schwingungsquelle als auch der Eigenfrequenz f_0 des stimulierten Resonators:
$f_R \approx f_E \approx f_0$.
Demnach absorbiert biologisches Gewebe die meiste elektromagnetische Feldenergie, wenn die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung der Eigenfrequenz f_0 des biologischen Gewebes entspricht. Diese Eigenfrequenz hängt von den Ausmaßen und der Struktur des Gewebes ab. Jede elektromagnetische Strahlungswelle mit einer streng definierten Frequenz f besitzt eine streng definierte Wellenlänge λ, die mithilfe der Gleichung

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (c\text{: Lichtgeschwindigkeit; } c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) \qquad \text{(i)}$$

bestimmt werden kann.
Zur Vereinfachung wollen wir die Eigenfrequenz f_0 anhand eines eindimensionalen Dipolmoleküls mit der Länge l erklären (vgl. Abb. 2). Seine Eigenfrequenz f_0 hängt von der Länge l des Dipols ab und kann mit Hilfe der Gleichung (i) berechnet werden:

$$f_0 = \frac{c}{l}. \qquad \text{(ii)}$$

Somit tritt das Phänomen der Resonanz genau dann ein, wenn die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung im Bereich der Abmessungen des biologischen Gewebes liegt.
Wegen der Komplexität des biologischen Gewebes (mehrdimensionale Ausmaße, verschiedene Molekülarten usw.) kann die Resonanzfrequenz bzw. die zugehörige Wellenlänge jedoch nur schwer oder ungenau berechnet, sondern muss meist abgeschätzt werden.

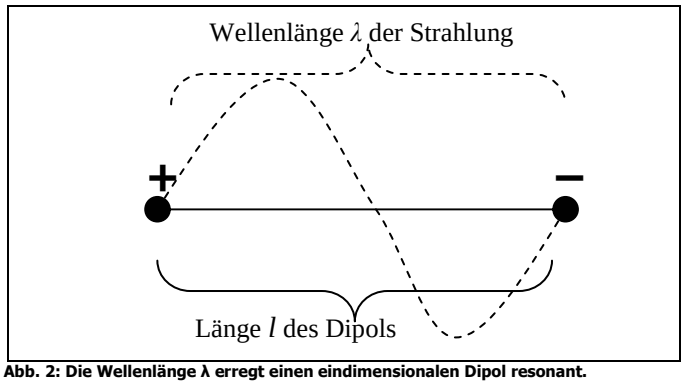


Abb. 2: Die Wellenlänge λ erregt einen eindimensionalen Dipol resonant.

Bienen als möglicher Bioindikator für nicht-thermische Einwirkung

Die Funktion der Biene als Bioindikator für thermische Einwirkungen wurde ausführlich von Kuhn dargelegt [Kuhn 2002; Kuhn 2003]. In diesem Beitrag wollen wir zeigen, dass Bienen ebenso als Bioindikator für nicht-thermische Einwirkungen bezüglich ihrer Lernprozesse dienen können.

Mit Hilfe dieser Kenntnis wäre es möglich, nicht-thermische Einwirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Verhaltensänderungen bei Bienen zu untersuchen und die Ergebnisse auf die Verhältnisse beim Menschen zu übertragen. Dies ist machbar, weil die Gehirnstruktur der Bienen bezüglich ihrer Lernprozesse der des Menschen ähnelt [Giurfa 2003; Stever & Kuhn 2003].

Bienen können auf drei Arten nicht-thermisch beeinflusst werden:

1. Zunächst besitzt der Körper der Biene selbst eine streng definierte Form. Somit kann diese Form resonant stimuliert werden, wenn die Wellenlänge - und damit auch die Frequenz - im Bereich der Körpergröße der Biene liegt (vgl. Abb. 3a)). Da die Körpergröße der Biene etwa zwei Zentimeter misst ($l \approx 0{,}02$ m), muss die Resonanzfrequenz f_R etwa 15 GHz betragen (s. Gleichung (ii)). Dies ist jedoch nicht die einzige Frequenz, mit der Bienen resonant erregt werden können. Da ihr Körper ausgedehnt ist, können sie durch eine Bandbreite von Frequenzen stimuliert werden, deren Grenzen experimentell erforscht werden müssten.

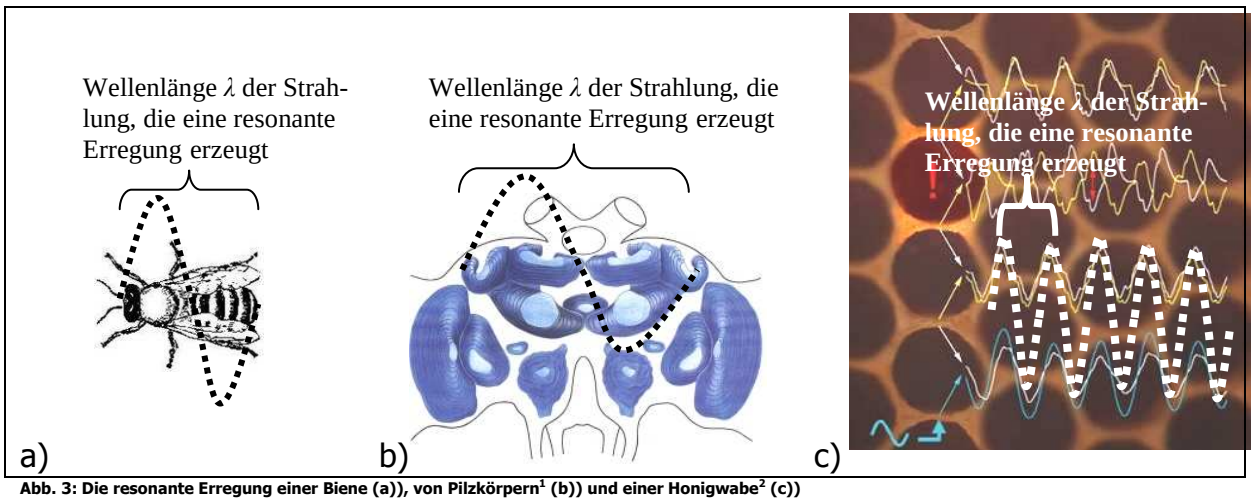


Abb. 3: Die resonante Erregung einer Biene (a)), von Pilzkörpern[1] (b)) und einer Honigwabe[2] (c))

2. Neben dem Bienenkörper besitzen auch die Pilzkörper[3] im Gehirn der Biene eine streng definierte Form (vgl. Abb. 4). Sie sind dort symmetrisch angeordnet. Insgesamt nehmen sie eine Fläche von etwa $250\text{-}300 \cdot 10^{-9}$ m² ein. Die größte Entfernung zwischen den beiden äußersten Grenzpunkten der Pilzkörper misst etwa 800µm. Somit können auch die Pilzkörper resonant erregt werden (vgl. Abb. 3b)). Wegen ihrer geringen Ausmaße ($l \approx 800 \cdot 10^{-6}$ m), ist die Resonanzfrequenz viel größer als die des Bienenkörpers (s. Gleichung (ii)). Sie kann bis zu 375 GHz betragen. Dieser Wert ist jedoch sehr kritisch, da die Pilzkörper mehrdimensionale Ausmaße aufweisen. Durch ihre Dreidimensionalität gestaltet sich die Berechnung der Resonanzfrequenz wesentlich komplexer als im eindimensionalen Fall. Darüber hinaus müssen wir auch die elektrischen Eigenschaften der Pilzkörper und ihrer Umgebung berücksichtigen. Somit sollte die Resonanzfrequenz f_R dieser Objekte ebenfalls experimentell ermittelt werden.

---

[1] Dieses Bild wurde der Internetseite www.neurobiologie.fu-berlin.de/mulan.html entnommen.

[2] Dieses Bild der Erregung einer Bienenwabe durch Wackeltänze wurde entnommen aus: bild der wissenschaft online, Natur (03.12.2001).

[3] Neurobiologische Untersuchungen zeigen, dass Veränderungen der Bienentätigkeit mit Modifikationen in bestimmten Bereichen ihres Gehirns zusammenhängen, speziell in solchen Bereichen, die Pilzkörper genannt werden [Withers et al. 1993; Faber & Menzel 2001]. Deshalb gehen wir davon aus, dass Pilzkörper Repräsentationen interner Modelle sind, die Ergebnisse der Lernprozesse einer Biene darstellen.

Infolge ihrer komplexen Gestalt besteht die Möglichkeit, dass Pilzkörper durch elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz von etwa 2 GHz resonant erregt werden. Somit muss dieser Frequenzbereich, in dem auch die Frequenzen der heutigen DECT-, GSM- und UMTS-Mobilfunktechnologien zu finden sind, ebenso für eine mögliche nicht-thermische, resonante Erregung der Pilzkörper berücksichtigt werden.

3. Die dritte Möglichkeit einer nicht-thermischen, resonanten Erregung von Bienen kristallisierte sich durch aktuelle Untersuchungsergebnisse heraus. Ergänzend zu der bekannten Theorie von Karl von Frisch, die die Kommunikation zwischen Bienen durch Wackeltänze beschreibt [von Frisch 1965], entdeckten Nieh und Tautz, dass die Wackeltänze die Honigwaben in Schwingung versetzen [Nieh & Tautz 2000; Nieh et al. 2001]. Die Frequenzen dieser Vibrationen liegen zwischen 200 Hz und 300 Hz. Durch die Vibration der Honigwabe wird die Information zu Bienen transportiert, die sich auf der Wabe in einiger Entfernung zu denjenigen Bienen aufhalten, die die Vibration erzeugen und dadurch eine Information übermitteln wollen. Da die DECT-Mobilfunktechnologie gepulste Signale übertragen, müssen wir sowohl ihre eigentliche Sendefrequenzen von 1880-1990 MHz als auch die Frequenz des gepulsten Signals von 100 Hz berücksichtigen. Diese Pulsfrequenz liegt im Bereich der Wackeltanzfrequenzen der Bienen, so dass der Bereich, in dem die Wabe durch diese Tänze in Schwingung versetzt wird, durch diese Pulsfrequenz resonant erregt werden kann (vgl. Abb. 3c)).

In einem ersten Schritt müssen somit zunächst die Resonanzfrequenzen f_R des Bienenkörpers (erste beschriebene Möglichkeit einer möglichen, nicht-thermischen Erregung) und der Pilzkörper im Bienengehirn (zweite beschriebene Möglichkeit einer möglichen, nicht-thermischen Erregung) experimentell ermittelt werden. Danach sollten die Bienen mit diesen Frequenzen bestrahlt werden. Beeinträchtigen diese Bestrahlungen die Lernkompetenz der Bienen[4], so wäre auch eine Beeinflussung der menschlichen Lernkompetenz durch diese resonante, nicht-thermische Erregungen möglich.

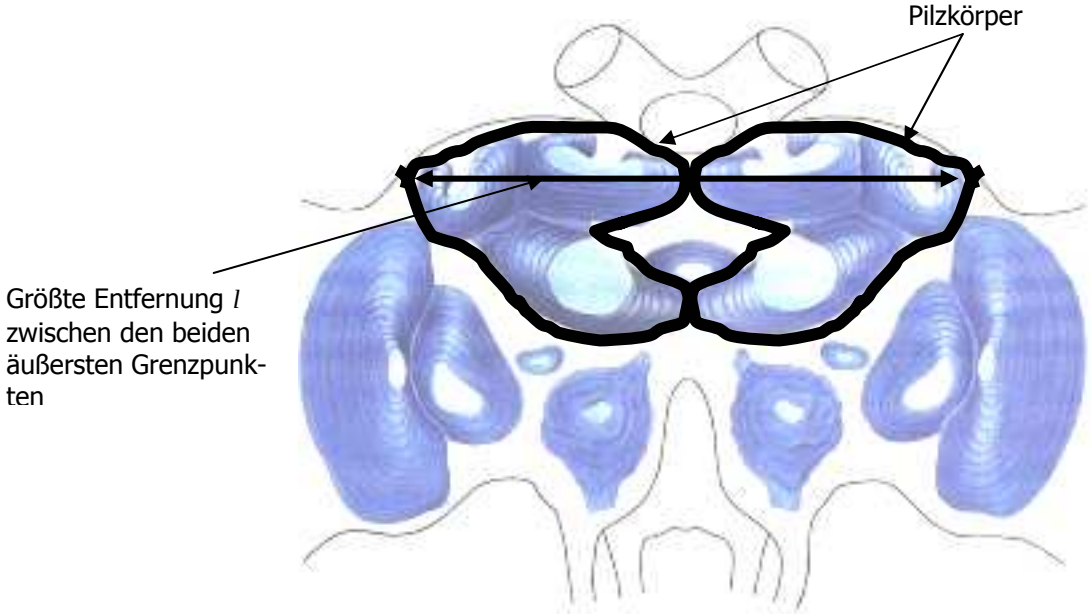


Abb. 4: Querschnitt durch das Gehirn einer Biene[5] (markierter Bereich: Pilzkörper).

[4] Eine Beeinträchtigung der Lernkompetenz der Bienen wäre erkennbar, wenn sie beispielsweise den durch den Schwänzeltanz angezeigten Futterplatz nicht finden, also die angezeigte Richtung „vergessen" und kein Futter oder keine Pollen eintragen können. Ein weiterer Hinweis auf eine veränderte Lernkompetenz bestünde darin, dass sich das Bauverhalten der Bienen ändert und ein signifikant vermehrter Wildbau zu beobachten ist.

[5] Das Bild des Querschnitts eines Bienengehirns wurde der Internetseite www.neurobiologie.fu-berlin.de/mulan.html entnommen.

Versuchsbeschreibung

Die in dieser Studie geplante Untersuchung nicht-thermischer Einwirkungen elektromagnetischer Felder auf das Verhalten von Bienen erfordert eine Exposition dieser Insekten mit den dazu notwendigen Resonanzfrequenzen (s. S. 10ff). Dazu werden Basisstationen handelsüblicher DECT-Telefone (Digital European Cordless Telecommunications) benutzt. Eine solche Basisstation sendet kontinuierlich mit einer Sendefrequenz $f_S \approx 1900$ MHz, sodass ständig elektromagnetische Wellen ausgestrahlt werden. Die durchschnittliche Sendeleistung P_S beträgt 10 mW, die Spitzenleistung dagegen 250 mW. Das Sendesignal ist frequenzmoduliert und gepulst mit einer Pulsfrequenz f_P von 100 Hz. Die Basisstation wird auf den Boden des Bienenkastens, direkt unter die Bienenwaben positioniert und eine Verbindung zum Handtelefon aufgebaut. Da sich die Station innerhalb des Bienenkastens befindet, können die Bienen auch die Sendeantenne jederzeit berühren. Durch diese technischen Rahmenbedingungen besteht die Möglichkeit, die in „Physikalisch-technische Designdetails", S. 10ff beschriebenen beiden ersten Möglichkeiten einer resonanten, nicht-thermischen Erregung zu untersuchen. In dieser Studie werden die daraus resultierenden Fragen der Beeinträchtigungen des Rückfinde- und Bauverhaltens untersucht.
Der Versuch wurde auf dem Gelände des DLR Fachzentrums für Bienen und Imkerei in Mayen von Studierenden des Studiengangs Umweltwissenschaften an der Universität Koblenz-Landau, Abt. Landau, durchgeführt. Verantwortlich vor Ort war Dr. Christoph Otten, die imkerliche Einführung der Studierenden besorgten die beiden Imkermeister Herr Krauß und Herr Wolters. Außer den unten beschriebenen Daten wurden auch die Wetterdaten über den Untersuchungszeitraum erhoben, aber aufgrund technisch bedingter Lücken nicht weiter ausgewertet.

Automatische Erfassung des Rückfindeverhaltens


Abb. 5: Bienenbeuten mit BeeScan

Es wurden insgesamt vier Bienenvölker *Apis mellifera carnica* zu je drei Zargen, entsprechend etwa 30.000 bis 40.000 Bienen, mit BeeScan Einheiten ausgestattet. Der BeeScan ist eine Einrichtung, um getrennt Ein- und Ausflüge der Bienen automatisch zu registrieren. Er wird vor dem Flugloch angebracht und erfasst in 32 Kanälen

per Infrarotlicht (IR) die Bewegungen der Bienen, ohne sie dabei zu behindern (s. Abb. 6).

Die Völker standen zusammen in einer Linie mit Flugloch in Nord-Süd-Ausrichtung. Die zwei äußeren Völker erhielten am 27.6.2005 je eine DECT-Telefon-Basisstation in ihre Bodenräume. Die automatische Datenerfassung startete am gleichen Tag. Der Versuch lief selbsttätig bis zum Morgen des 8.7.2005.

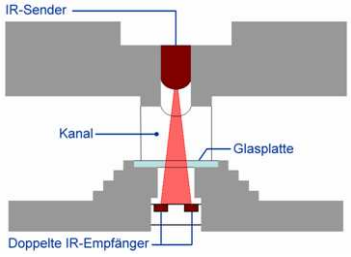


Abb. 6: Funktionsschema des BeeScan

Manuelle Erfassung des Rückfindeverhaltens


Abb. 7: Für die Erfassung vorbereitete Beuten

Acht Völker in Mini-Plus-Beuten mit drei bis vier Zargen wurden untersucht, davon waren vier Beuten im Boden mit Basistationen versehen. Die Völker waren am gleichen Ort in einer Reihe in Ost-West Ausrichtung aufgestellt, die vier Völker mit Basisstationen östlich, die anderen westlich. Die Fluglöcher der Völker befanden sich auf der Südseite. Nördlich der Völker stand in ca. 2 m Entfernung Baumbewuchs, der allerdings keinen Schatten auf die Versuchsanordnung warf.

An den Fluglöchern der Völker waren 10 cm lange Plexiglasröhren mit 4 cm Durchmesser befestigt, mit denen aus- und einfliegende Bienen abgefangen wurden. Zum Einfangen der ausfliegenden Bienen wurde das äußere Ende der Röhre mit Haushaltsfolie verschlossen. Wenn sich genug Bienen in der Röhre befanden, wurde das andere Ende mit Karton abgedeckt, die Röhre vom Flugloch entfernt und eine neue Röhre angelegt. Die Röhre mit den abgefangenen Bienen wurde dann mit passenden Stopfen verschlossen.

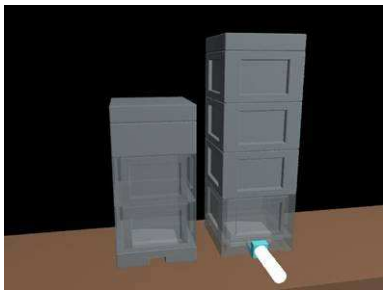

Abb. 8: Schema der Mini-Plus-Beuten


Abb. 9: Markierung der Bienen

Für jeden Versuchsdurchgang wurde von je einem bestrahlten und einem unbestrahlten Volk 25 Bienen am Flugloch abgefangen. Die Bienen wurden dann durch Abkühlung in einer mit Kühlakkus bestückten Kühlbox ruhig gestellt. Die Völkerzuordnung wurde mit einem

Farbpunkt (Edding 750) auf dem Thorax kenntlich gemacht.
Alle gekennzeichneten Bienen wurden zusammen an den Ortsausgang gebracht und dort gleichzeitig freigelassen. Die Entfernung zum Stock betrug 750-800 m Luftlinie in südöstlicher Richtung mit einer Flugroute über bebautes Wohngebiet mit Einfamilienhäusern und Gärten.
Die Zeit wurde ab Freisetzung der Bienen gemessen. An den Fluglöchern wurden dann die ankommenden markierten Bienen abgefangen und ihre Flugzeit notiert. Abgefangene Bienen wurden aus dem System entfernt. Die maximale Wartezeit pro Durchgang betrug 45 Minuten. Bienen, die bis zum Ablauf der Zeit nicht angekommen waren, wurden nicht mehr berücksichtigt.
Nach Möglichkeit wurden auch mehrere Durchgänge gleichzeitig durchgeführt.

Bauverhalten


Abb. 10: Aufstellung für das Bauverhalten

Sechzehn Bienenvölker in je einer Mini-Plus-Beute mit einer Zarge und aufgesetztem Futterraum wurden auf zwei Regalbrettern in Richtung Nord-Süd aufgestellt, die in ca. 80 cm Höhe an einer Gebäudewand entlang laufen. Die acht Völker mit Basisstationen waren zusammen auf der nördlichen Seite aufgestellt. Die Fluglöcher der Völker zeigten nach Osten, Bäume beschatteten die Völker etwa gleichmäßig über den Tag.
Zu Beginn des Versuches wurden die leeren Rähmchen mit Anfangsstreifen gewogen. Die Zargen wurden am 29.6.2005 mit jeweils 400 g Bienen gefüllt und mit 250 ml Flüssignahrung versehen. Weitere Fütterungen erfolgten am 5.7.2005 mit 200 ml und am 7.7.2005 mit 500 ml.
Ab dem 1.7.2005 wurden dann ab ca. 9.30 Uhr jeden Tag von jeder Wabe jeweils Vorder- und Rückseite fotografiert sowie das Gewicht bestimmt. Die Fotos wurden soweit möglich immer in der gleichen Reihenfolge aufgenommen.


Abbildung 11: Anordnung zur Wabenfotografie

Darstellung der Versuchsergebnisse

Da es sich bei der durchgeführten Untersuchung um eine Pilotstudie handelt, wird an dieser Stelle auf eine differenzierte statistische Auswertung der Versuchsergebnisse verzichtet. Es werden exemplarisch lediglich die auffälligsten Unterschiede zwischen bestrahlten und unbestrahlten Völkern hinsichtlich des erreichten Wabengewichtes und der Rückkehrzeiten grafisch dargestellt. Für die Verläufe der Wabengewichts und der vermessenen Baufläche werden die Mittelwerte von bestrahlten und unbestrahlten Völkern verglichen und ebenfalls im Diagramm dargestellt.
Die automatische Erfassung des Rückfindeverhaltens durch den BeeScan wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da durch technisch bedingte Ausfälle zu viele kontinuierliche Werte fehlen.

Die beiden ersten Grafiken geben die Verteilung der vorgenannten mittleren Gesamtgewichte auf die einzelnen Waben wieder. Von den untersuchten Bienenvölkern sind im Verlauf des Versuch drei bestrahlte Völker und ein unbestrahltes Bienenvolk ausgefallen. Für die Mittelwertberechnung wurde das zum Zeitpunkt des Ausfalls erreichte Wabengewicht verwendet.
Bei gleichen Ausgangsgewicht der Waben betragen die Mittelwerte des Gesamtgewichtes der bestrahlten und unbestrahlten Völker bei Beendigung des Versuchs 1326 g und 1045 g. Die Differenz beträgt folglich 281 g (21,1%).

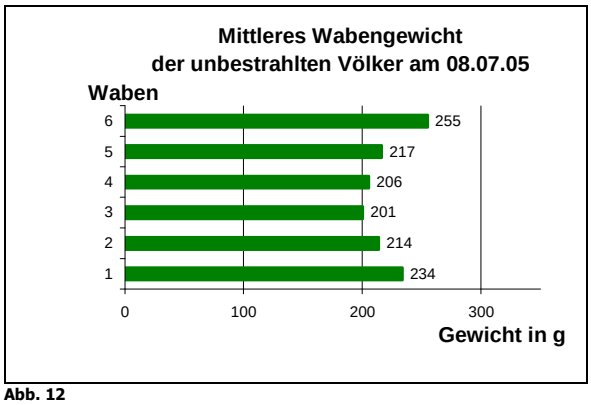


Abb. 12

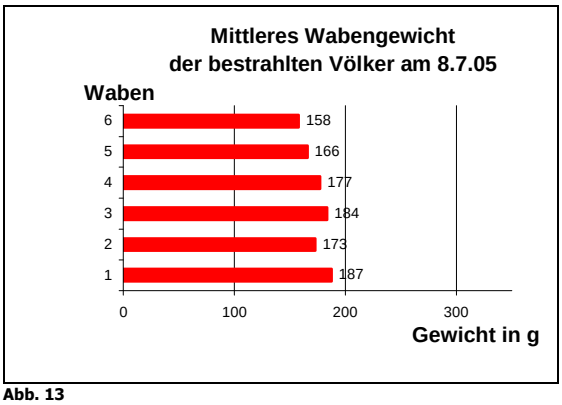


Abb. 13

Die beiden folgenden Grafiken zeigen die Verläufe für Wabengewichte und Baufläche über den Untersuchungszeitraum. Für die o.g. ausgefallenen Völker wurden die Werte zum Zeitpunkt des Ausfalls bis zum Versuchsende als Konstante weitergeführt. Da die Bautätigkeit nicht direkt als Flächenwert während des Versuchs erhoben werden

konnte, wurden zur Auswertung mit Hilfe des Grafik-Tools ImageJ (ein Bildanalyse-Programm des Institute of Mental Health, USA) die Fotos der Waben in Flächenwerte umgesetzt, wobei für die Flächen aus Vorder- und Rückseitenfoto für die jeweilige Wabe der Mittelwert verwendet wurde, um etwaige Messfehler bei der Flächenbestimmung zu minimieren. Die Bauform konnte nicht berücksichtigt werden, wozu es aber auch nach Sichtung der Fotos keine Veranlassung gab, da keine musterhaften Unterschiede zwischen bestrahlten bzw. unbestrahlten Waben zu erkennen waren.

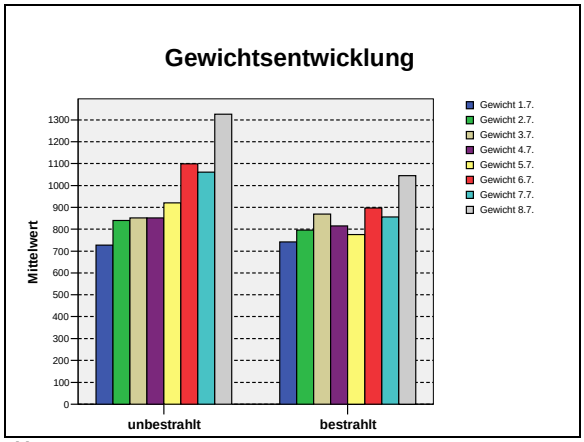


Abb. 14

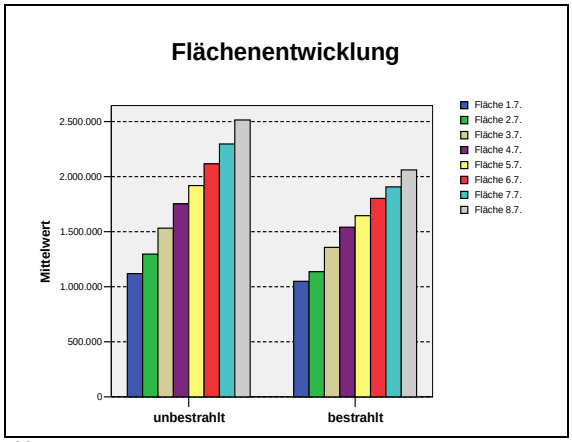


Abb. 15

Die Verläufe über den Versuchszeitraum machen deutlich, dass sowohl bei der Gewichts- als auch der Bauflächenentwicklung die unbestrahlten Völker höhere Werte erzielen. Dies darf aber lediglich als Tendenz bzw. Trend gewertet werden, ein zu Deskriptionszwecken durchgeführter Mann-Whitney U-Test ergab für keinen Tag des Untersuchungszeitraums einen Unterschied (5%-Niveau) zwischen unbestrahlten und bestrahlten Völkern.

Die nachfolgenden Grafiken stellen das Rückkehrverhalten, des am 7.7.2005 in der Zeit von 12:10 Uhr bis 12:55 Uhr bei Bewölkung, 14°C Lufttemperatur und Nordwind durchgeführten Versuchs zur manuellen Erhebung des Rückkehrverhaltens dar.
Zum einen ist die Anzahl der zurückkehrenden Bienen aus unbestrahlten Bienenvölkern deutlich höher, zum anderen ist die Rückkehrzeit der (wenigen zurückkehrenden) Bienen aus bestrahlten Völkern deutlich länger.

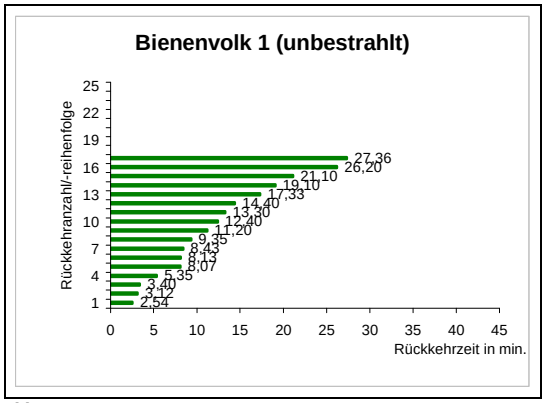


Abb. 16

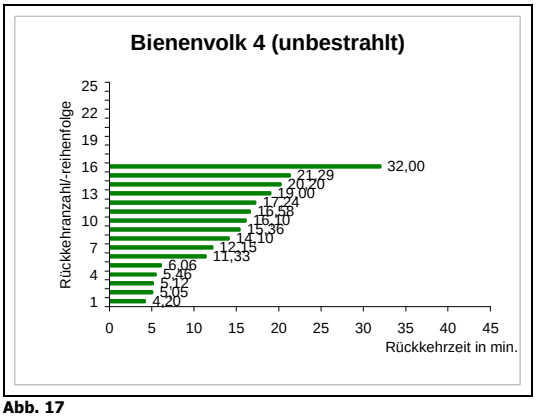


Abb. 17

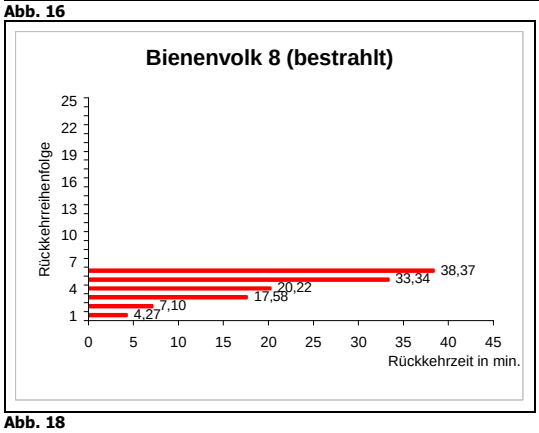


Abb. 18

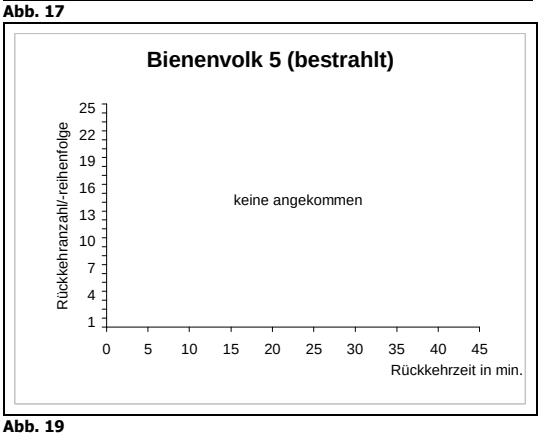


Abb. 19

Besonders hervorzuheben wäre hier noch der Umstand, dass der ausgewählte Untersuchungszeitpunkt das jeweilige Maximum der Rückkehrzahlen sowohl für unbestrahlte als auch bestrahlte Bienen darstellt. Zu keinem Zeitpunkt der Untersuchung kamen also mehr als 6 bestrahlte Bienen im Beobachtungszeitraum zurück, mehrfach sogar gar keine, wohingegen bei den unbestrahlten Bienen zu jedem Untersuchungszeitpunkt zurückkehrende Bienen beobachtet werden konnten.

Ausblick: Perspektiven und Modifikationsmöglichkeiten

Aus physikalisch-technischer Sicht sind viele Modifikationen des Versuchsdesigns denkbar (z.B. Frequenz- oder Leistungsvariation). Sinnvollerweise sollten sich die Untersuchungen allerdings hauptsächlich auf solche Frequenz- und Leistungsbereiche beziehen, die auch im Alltag anzutreffen und deshalb von originärem Interesse sind.
Aus dieser Sicht wären zukünftig folgende physikalisch-technische Variationen denkbar:

1. Leistungssteigerung:
   Für eine „Worst-Case"-Untersuchung müsste die DECT-Basisstation im aktiven Zustand mit maximaler Sendeleistung betrieben werden.
2. Frequenzmodifikation:
   Als Mobiltelefone werden einerseits die in dieser Untersuchung verwendeten DECT-Telefone bezeichnet, die hauptsächlich innerhalb geschlossener Gebäude verwendet werden und dort schnurlos über eine Basisstation mit dem Telefonfestnetz verbunden sind. Andererseits gehören auch die herkömmlich als „Handys" bezeichneten Geräte in die Kategorie der Mobiltelefone. Die momentan verbreitetste Art sind GSM-Handys (Global System for Mobile Communication), die sich u.a. in ihrer Sendefrequenz von DECT-Telefonen unterscheiden (s. Anhang). Diese Mobiltelefone können sowohl in geschlossenen Gebäuden als auch im Freien verwendet werden und sind schnurlos über eine im freien Gelände weiter entfernt befindliche Basisstation mit dem Telefonfestnetz verbunden. Da Handys allerdings über eine Leistungsregelung verfügen, die in Sprechpausen die Sendeleistung reduziert, müssten solche Geräte für eine „Worst-Case"-Untersuchung im aktiven Zustand betrieben werden.

	DECT	**GSM**
Frequenz:	1880 – 1990 MHz	890 – 960 MHz (GSM 900) 1760 – 1865 MHz (GSM 1800)
Pulsfrequenz:	100 Hz	217 Hz
Kanalzahl:	120	124 (GSM 900) 374 (GSM 1800)
Sendeleistung:	10 mW mittlere Leistung (max. 250 mW; 2,5 mW im Standby-Modus)	Max. 2 W (ca. 20 mW im Standby-Modus)
Max. Reichweite:	Ca. 200 m in Gebäuden	Bis zu 38 km (je nach Umgebungsbeschaffenheit)
Duplexverfahren	Zeitduplex (10 ms Rahmenlänge)	Zeitduplex (20 ms Rahmenlänge)
Multiplexverfahren:	Frequenzmultiplex (FDMA)	Frequenzmultiplex (FDMA)
Modulation:	GMSK (Gaußian Minimum Schift Keying)	TDMA (Time Division Multiple Access)

Tab. 1: Übersicht technischer Daten

Weitere Variationen könnten auch im Versuchsaufbau im Hinblick auf die Platzierung der Beuten und Expositionszeiträume erfolgen. So sollte beispielsweise die Aufstellung der Bienenvölker statt in Block- in alternierender Form stattfinden, um mögliche Standorteffekte zu minimieren. Es wäre weiterhin denkbar, den Untersuchungszeitraum in mehrerer Hinsicht zu verändern und zu erweitern, um beispielsweise die gesamten Entwicklungsstadien der Bienen und nicht nur den adulten Zustand zu untersuchen oder die Bestrahlungszeiträume zu variieren und dabei mögliche Änderungen des Rückkehrverhaltens zu beobachten.

Literatur

Faber, T. & Menzel, R. (2001). Visualizing mushroom body response to a conditioned odor in honeybees. *Naturwissenschaften 88*, 472-476.

Ganzhorn, K. (1986). Information, Strukuren und Ordnungsprinzipien, in: Folberth, Hackl (Hrsg.): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft München, S. 105 ff.

Giurfa, M. (2003). The amazing mini-brain: lessons from a honey bee. *Bee World, 84* (1), 5-18.

Kuhn, J. & Stever, H. (1999a). Die Beeinflussung des elektrischen Feldes durch die verschiedenen Materialien der Bienenkästen (Beuten). *Bienenwelt, 41* (3), 3-5.

Kuhn, J. & Stever, H. (1999b). Die Beeinflussung des elektrischen Feldes durch die verschiedenen Materialien der Bienenkästen (Beuten). *Bienenwelt, 41* (4), 3-4.

Kuhn, J. & Stever, H. (2001): Schutz der Bienen vor Handy-Strahlung in: *Schweizerische Bienen-Zeitung 124*, Heft 9, S. 23-27

Kuhn, J. & Stever, H. (2002): Einwirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Bienenvölker – Erste Ergebnisse und Beobachtungen in: *Deutsches Bienen Journal 10*, 2002, 151-154

Kuhn, J. (2002). Interdisziplinarität in Wissenschaft und Bildung. Marburg: Tectum Verlag.

Kuhn, J. (2003). An Advanced Interdisciplinary Study in Theoretical Modelling of a Biological System – The Effect of High-Frequency Electromagnetic Fields on Honey Bees. *ACTA Systemica – IIAS International Journal III* (1), 31-36.

Lánský, M. (1982): Ein mathematisches Modell für die Bildung von Ganzheiten in: Schauer, Tauber (Hrsg.): Informatik und Psychologie, Wien, München, S. 278 ff.

Menzel, R. (1993). Associative learning in honey bees. *Apidologie 24* (3), 157-168.

Nieh, J. C. & Tautz, J. (2000). Behaviour-locked analysis reveals weak 200-300 Hz comb vibrations during the honeybee waggle dance. *The Journal of Experimental Biology 203*, 1573-1579.

Papaj, D. R. & Lewis, A. C. (Hrsg.). (1993). Insect Learning – Ecological and Evolutionary Perspectives. New York, London: Chapman & Hall.

Rasband, W. (o.J.). ImageJ – Image Processing and Analysis in Java. *http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html*

Stever, H. (1991): Bewertung und Information als Problemfeld der Kybernetischen Pädagogik und Bildungsinformatik, in L. Kouba (Hrsg.) Fourth Prague Conference on Educational Cybernetics, Prag, S. 310-314

Stever, H. (1996):Bildungsinformatik an der Universität in Landau in: Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaften (grkg) 37, S. 107-110

Stever, H. (2002). Theorie der Superzeichen im Rahmen der Bildungsinformatik. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft (grkg) 43*, 9-15.

Stever, H. (2003). Erweiterte Theorie der Superzeichen im Rahmen der Bildungsinformatik. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft (grkg) 44*, 27-33.

Stever, H. & Kuhn, J. (2003a). Electromagnetic Exposition as an Influencing Factor of Learning Processes – A Model of Effect in Educational Informatics. *IIAS-Transactions on Systems Research and Cybernetics: International journal of the International Institute for Advanced Studies in Systems Research and Cybernetics III* (1), 27-31.

Stever, H. & Kuhn, J. (2003b). Elektromagnetische Exposition als Einflussfaktor für Lernprozesse - ein Einwirkungsmodell der Bildungsinformatik mit Bienen als Bioindikator. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 44* (2003), Heft 4, 179-183.

Stever, H. & Kuhn, J. (2004). Theorie der Superzeichen als Basis für ein Einwirkungsmodell zur Beeinflussung von Lernprozessen durch nicht-thermische Einwirkungen elektromagnetischer Strahlung. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 45* (2004), Heft 2, 51-61.

Stever, H. & Svejda, G. (2003). *Rozsirená Teorie Superznaku*. Ceske Budejovice.

Tautz, J., Casas, J. & Sandeman, D. (2001). Phase reversal of vibratory signals in honeycomb may assist dancing honeybees to attract their audience. *The Journal of Experimental Biology 204*, 3737-3746.

Von Frisch, Karl. (1965). Tanzsprache und Orientierung der Bienen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.

Withers, G. S., Fahrbach, S. E. & Robinson, G. E. (1993). Selective neuroanatomical plasticity and division of labour in the Honeybee. *Nature 364*, 238-240.

Autorenverzeichnis

Dipl.-Psych. **Wolfgang Harst**
Universität Koblenz-Landau, Campus Landau
FB 7: Natur- und Umweltwissenschaften
Institut für Mathematik, Arbeitsgruppe Bildungsinformatik
Thomas-Nast-Str. 44
76829 Landau / Pfalz
harst@uni-landau.de

Dr. **Jochen Kuhn**
Universität Koblenz-Landau, Campus Landau
FB 7: Natur- und Umweltwissenschaften
Institut für Naturwissenschften und Naturwissenschaftliche Bildung
Abteilung Physik
Fortstr. 7
76829 Landau / Pfalz
kuhn@uni-landau.de

Dr. **Christoph Otten**
DLR Fachzentrum für Bienen und Imkerei
Im Bannen 38-45
56727 Mayen
christoph.otten@dlr.rlp.de

Prof. Dr. **Hermann Stever**
Universität Koblenz-Landau, Campus Landau
FB 7: Natur- und Umweltwissenschaften
Institut für Mathematik, Arbeitsgruppe Bildungsinformatik
Thomas-Nast-Str. 44
76829 Landau / Pfalz
stever@uni-landau.de

Dipl.-Stat. **Bernd Wunder**
Universität Koblenz-Landau, Campus Landau
Universitätsrechenzentrum
Fortstr. 7
76829 Landau / Pfalz
wunder@uni-landau.de

Wir danken Prof. Dr. Ralf Schulz vom Institut für Umweltwissenschaften der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau für die produktive Zusammenarbeit, den Studierenden der Umweltwissenschaften Martina Emser, Bernd Guckenmus, Corinna Herrmann, Stefan Kimmel, Christoph Klasen, Norbert Krauß und Tobias Reich für ihr Engagement bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Studie und den beiden Imkermeistern Johannes Kraus und Gerald Wolters für die Unterstützung der Studierenden vor Ort in Mayen.

Dieser Text kann auch unter http://agbi.uni-landau.de als PDF heruntergeladen werden.