

Normale Entwicklung der Fliege *Drosophila* in Niederfrequenten Magnetfeldern

Normal Development of the Fruitfly *Drosophila* in VLF Magnetic Fields

Karl Georg Götz

Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen

und

Simon Götz

Ferdinand Christian Baurstraße 15, Tübingen

(Z. Naturforsch. **32 c**, 125–132 [1977]; eingegangen am 2. September 1976)

Electromagnetic Fields, Biomagnetism, Morphogenesis, Gene Mutation, Fruitfly *Drosophila*

Attempts to substantiate irreversible actions of a variety of magnetic fields on the fruitfly, *Drosophila melanogaster*, have been successful and unsuccessful in about equal numbers. The most conspicuous mutagenic effects apparently induced by pulsed HF-fields¹ failed to appear under continuous electromagnetic irradiation². This seems to correlate the observed damage with the VLF-components of the pulsed fields. The present investigation is motivated by the occurrence of these components both in the atmosphere and in the vicinity of electrical appliances. A strain of normally viable wild type males and subnormally viable *Attached-X y w* females was used in which the yield, and the sex ratio, of the progeny indicate, respectively, the extent of developmental damage and of sex-linked recessive lethal mutation induced by the exposure to detrimental conditions. Evaluation of 73,800 flies from subsequent generations of a control group and two test groups raised in steady, or rotating, homogeneous 9.6 kHz magnetic fields of about 2.5 G did not reveal any developmental or hereditary load in the test groups. (¹ Presman 1970; ² Mittler 1973.)

Eine allgemeine biologische Wirksamkeit natürlicher Magnetfelder im Frequenzbereich 0–10 kHz bzw. künstlicher Magnetfelder im Frequenzbereich 0–100 GHz erscheint durch zahlreiche Untersuchungen hinreichend gesichert^{1,3–6}. Da der Energiegehalt der elektromagnetischen Strahlung proportional mit der Frequenz ansteigt und zusätzlich die Strahlungsabsorption des Gewebes mit der Wurzel der Frequenz zunimmt, sind thermochemisch wirksame Energiedichten und strahlenchemisch wirksame Anregungsenergien erst im Mikrowellenbereich oberhalb von etwa 100 MHz zu erwarten. Daß magnetische Wechselfelder bei wesentlich tieferen Frequenzen z.B. durch Kräfte auf Ladungsträger im Gewebe physiologisch wirksam und möglicherweise schädlich sein können, ist der oft kontroversen Literatur auf diesem Gebiet zu entnehmen.

Die bekannt gewordenen Untersuchungen an der Fruchtfliege *Drosophila melanogaster* ergeben insgesamt kein einheitliches Bild der irreversiblen biologischen Wirkungen von Magnetfeldern. Während Forssberg⁷ gezeigt hat, daß die schädigende Wirkung von Röntgenstrahlen auf die Erbanlagen der Fliege durch Anlegen eines magnetischen Gleichfelds

begünstigt wird, konnte Mittler^{8,9} nachweisen, daß ein Feld von 10 kG bei unbestrahlten Fliegen keine nachweisbaren Chromosomenschäden hervorbringt und bei bestrahlten Fliegen die Reparatur solcher Schäden nicht nachweisbar behindert. Andererseits haben die Versuche an *Drosophila* Hinweise auf günstige Feldwirkungen im Sinne der „Magnetischen Curen“ des Franz Anton Mesmer (1734–1815)¹⁰ ergeben. Im Bereich zwischen 750 und 1900 G haben Akhmerov^{1,11} und Shakhbazov^{1,12} einen Anstieg der Vermehrungsrate bei den Nachkommen feldbehandelter Fliegen festgestellt und auf Feldwirkungen in der Entwicklungsphase geschlossen. Dagegen haben Steen und Oftedal¹³ aus der Beobachtung der Schlüpfzeit unter Feldeinwirkung von 1600 und 5000 G keinen Hinweis auf feldbedingte Entwicklungsstörungen erhalten. Die gezielte Anwendung inhomogener Magnetfelder von 22 kG führt nach Levengood^{14,15} zu nachhaltigen Entwicklungsstörungen in den Folgegenerationen. Die beobachtete Abnahme der Vermehrungsrate und Zunahme der Entwicklungszeit konnte von Posch¹⁶ unter gleichartigen Versuchsbedingungen nicht reproduziert werden. Während die Anwendung inhomogener Magnetfelder nach den Versuchen von Chevais und Manigault¹⁷ erbliche Flügel- und Letalmutationen hervorzurufen scheint, ist die Wirkung

Sonderdruckanforderungen an Prof. Dr. K. G. Götz, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Spemannstraße 38, 7400 Tübingen.



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition “no derivative works”). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

dieser Felder in den Versuchen von Mulay und Mulay^{3, 18} auf nicht erbliche Flügel- und Augendefekte beschränkt. Um diese Defekte hervorzubringen, sind Felder von mehr als 3000 G erforderlich. Daß von Beischer^{3, 19} in extrem starken homogenen (140 kG) und inhomogenen (10 kG/cm) Magnetfeldern keine Schäden dieser Art beobachtet wurden, läßt wegen des geringen Umfangs der Stichproben keine eindeutige Aussage über die Unschädlichkeit derartiger Felder zu. Während starke Felder relativ unwirksam zu sein scheinen, hat Tegenkamp^{4, 20} bei verhältnismäßig schwacher Induktion sowohl oberhalb als auch unterhalb des erdmagnetischen Hintergrunds von 0,5 G erhöhte Mutationsraten festgestellt.

Da bei frei beweglichen Tieren Größe und Richtung der einwirkenden Magnetfelder im allgemeinen veränderlich sind, besteht die Möglichkeit, daß einige der gefundenen Effekte durch zeitliche Feldänderungen hervorgerufen werden. Ein direkter Hinweis in dieser Richtung ist den wenigen veröffentlichten Untersuchungen nicht zu entnehmen. Chevais und Manigault¹⁷ haben beim Übergang zu niederfrequenten magnetischen Wechselfeldern keine Erbschäden feststellen können. Zum gleichen Ergebnis gelangte auch Mittler²¹ bei Verwendung schwacher Wechselfelder von 1 G im Frequenzbereich zwischen 45 und 75 Hz. Langsam rotierende Magnetfelder, die nach Persinger⁵ besondere biologische Wirkungen hervorbringen können, sind anscheinend bisher noch nicht auf *Drosophila* angewendet worden. Ein indirekter Hinweis auf mögliche Feldwirkungen im Kilohertzbereich ergibt sich aus folgenden Befunden. Heller und Mickey^{1, 22} sowie Mickey^{1, 23} haben in gepulsten Wechselfeldern von einigen Megahertz erbliche und nicht erbliche Dauerschäden der Fruchtfliege *Drosophila* festgestellt. Die ermittelte Häufigkeitszunahme bestimmter Letalmutanten um den Faktor 13 und das Männchen/Weibchen-Verhältnis von 1 : 8 bei den Nachkommen feldbehandelter Eltern lassen auf ungewöhnliche Mutationsraten weit oberhalb der Nachweisgrenze schließen. Dagegen hat die Verwendung starker, ungepulster Felder mit vergleichbaren Trägerfrequenzen von 29 MHz und 146 MHz in den Versuchen von Mittler² keinen Hinweis auf Schädigung der Erbanlagen von *Drosophila* ergeben. Wenn diese Befunde konsistent sind, müßte die schädigende Wirkung der gepulsten Wechselfelder auf der Modulation des Trägers mit Frequenzen im

Kilohertzbereich beruhen. Die biologische Wirksamkeit dieses Frequenzbereichs wurde bisher kaum untersucht⁵, und es sind bisher keine Arbeiten über den Einfluß derartiger Wechselfelder auf die Fruchtfliege bekannt geworden.

Im folgenden wird der Versuch unternommen, die möglichen biologischen Langzeiteffekte schwacher homogener magnetischer Wechselfelder im 10 kHz-Bereich bei konstantem bzw. rotierendem Feldverlauf abzuschätzen. Magnetfelder dieser Art lassen sich nicht nur in der Atmosphäre, sondern häufig auch in der Nachbarschaft von Fernsehgeräten, Rechenanlagen und anderen technischen Einrichtungen nachweisen^{5, 6}.

Methoden

Versuchsmaterial

Um mögliche Feldwirkungen auf die Erbanlagen und die Entwicklungsfähigkeit des Zellgewebes von *Drosophila* gleichzeitig, nach einfachen Kriterien und mit hinreichender Empfindlichkeit nachweisen zu können, wurden die Untersuchungen an Wildtyp-Männchen mit normaler Entwicklungsfähigkeit und *Attached-X y w*-Weibchen mit verminderter Entwicklungsfähigkeit vorgenommen. Da die verbundenen mütterlichen X-Chromosomen nur in der weiblichen Linie vererbt werden können, sind alle weiblichen Nachkommen als homozygote Träger der Merkmale *y* und *w* für Massenzählungen hinreichend durch ihre helle Körper- und Augenfarbe gekennzeichnet. Die weibliche Nachkommenzahl des verwendeten Stammes erreicht unter günstigen Zuchtbedingungen nur etwa 60% des Erwartungswerts. Eine geringfügige Verschlechterung der Entwicklungsbedingungen führt hier bereits zu weiterer Reduzierung und daher vor allem zu einer Abnahme der Summe $S = \sigma\sigma + \varphi\varphi$ der Nachkommen in der Folgegeneration. Da das väterliche X-Chromosom in diesem besonderen Fall nur in der männlichen Linie vererbt werden kann, sind alle männlichen Nachkommen des verwendeten Stammes hemizygot Träger von Mutationen, die auf diesem Chromosom entstehen. Die am häufigsten induzierten rezessiven Letalmutationen führen hier bereits in der nächsten Generation zum Ausfall nicht lebensfähiger männlicher Nachkommen und damit zur Abnahme des Verhältnisses $\sigma\sigma/\varphi\varphi$ bzw. der Differenz $D = \sigma\sigma - \varphi\varphi$. Die Unterschiede in der Größe und Zusammensetzung der feldbehandelten Testgruppen und der unbehandelten Kontrollgruppen liefern Hinweise auf mögliche Entwicklungs- und Erbschäden unter Feldeinwirkung. Verglichen werden im

folgenden die *Gruppengröße* S und die *Gruppenzusammensetzung* D/S , die als relative Differenz Werte zwischen -1 ($\sigma\sigma=0$) und $+1$ ($\varphi\varphi=0$) annehmen kann.

Versuchseinrichtung

Zur Erzeugung unterschiedlicher magnetischer Wechselfelder von 9,6 kHz wurden zwei gleichartige Helmholtz-Spulenpaare mit einem Spulenradius von 20 cm verwendet. Der auf Luft bezogene Effektivwert der Induktion im homogenen Bereich der Magnetfelder wurde aus dem Spulenstrom ermittelt. Für die *Feldgruppe* F_- wurde im einen Spulenpaar ein kontinuierliches *longitudinales* Wechselfeld von 1,7 G erzeugt. Dagegen wurde für die *Feldgruppe* F_+ im anderen Spulenpaar der Spulenstrom periodisch für 30 ms eingeschaltet und für 15 ms ausgeschaltet, wobei die Erregung der beiden Spulen abwechselnd gleichphasig und gegenphasig erfolgte. Das entsprechende intermittierende Wechselfeld von 3,4 G war daher abwechselnd *longitudinal* bzw. *transversal* zur Spulenachse gerichtet. Mit dieser Anordnung sollte vor allem der Einfluß der Feldrotation⁵ auf die Entwicklungsfähigkeit und die Erbanlagen der Fliege untersucht werden. Im Bereich der Wechselfelder konnten je 20 Zuchtgläser mit 160 ml Inhalt untergebracht werden, die zu einem Drittel mit *Drosophila*-Standardnährmedium gefüllt waren. Für die *Kontrollgruppen* K wurde die entsprechende Anzahl von Zuchtgläsern in einem wechselfeldfreien Teil des gleichen Raums aufgestellt. Zur Abschirmung der Wechselfelder wurde Baustahlgewebe verwendet.

Versuchsablauf

Zur Vorbereitung der Versuche wurden die Weibchen des verwendeten Stammes nach dem Purin-virginatorverfahren²⁴ mit Männchen der nicht purinresistenten Mutante *mal* gekreuzt. Bei Verwendung von purinhaltigem Nährmedium besteht die Nachkommenschaft in diesem Fall ausschließlich aus unbefruchteten Weibchen. Als Vorversuch und zur Erzeugung magnetisch vorbehandelter Männchen wurden in der 1. *Versuchsserie* 20 Zuchtgläser mit je 8 unbefruchteten *Attached-X*-Weibchen und 8 Wildtyp-Männchen für insgesamt 54 Tage in das magnetische Wechselfeld F_- gebracht, wobei die effektive Feldstärke im Verlauf des Versuchs auf den angegebenen Endwert gesteigert wurde. Weitere 20 Zuchtgläser gleicher Besetzung wurden für die Dauer des Versuchs im Kontrollbereich K aufgestellt. Durch die verhältnismäßig niedrige Raumtemperatur von durchschnittlich etwa $16 \pm 4^\circ\text{C}$ wurde die Entwicklung von Nachkommen reduziert

und retardiert und eine verlängerte Feldeinwirkung erreicht. Das Gesamtergebnis der Auszählung der Nachkommen der Versuchs- und Kontrollgruppe 1F₋ und 1K ist in Tab. I zusammengestellt.

Tab. I. Anzahl der männlichen und weiblichen Nachkommen in den Vorversuchsgruppen.

I. Serie	♂♂	♀♀	Σ
FELD 1F ₋	423	33	456
KONTR. 1K	722	277	999
Σ	1145	310	1455

In der 2. *Versuchsserie* wurden insgesamt 80 Zuchtgläser mit je 10 unbefruchteten *Attached-X*-Weibchen aus der Virginatorzucht sowie mit je 10 Wildtyp-Männchen aus der Nachkommenschaft des ersten Ansatzes versehen. Insgesamt 40 Gläser enthielten magnetisch vorbehandelte Männchen und wurden je zur Hälfte mit den Gruppenbezeichnungen 2F₋ bzw. 2F₊ in die entsprechenden magnetischen Wechselfelder gebracht. Weitere 40 Gläser enthielten unbehandelte Männchen und wurden zu je 20 auf die Kontrollgruppen 2K' und 2K'' verteilt. Die Raumtemperatur wurde auf durchschnittlich etwa $22 \pm 2^\circ\text{C}$ angehoben, wobei die Raumluftkonvektion ein geringfügiges Temperaturgefälle von den Versuchsgruppen zu den Kontrollgruppen erzeugte. Die Auszählung der Nachkommen der der Feldgruppen und der Kontrollgruppen wurde in der Zeit vom 16. bis 36. Tag nach Ansatz in paralleler zeitlicher Folge vorgenommen. In den ersten 6 Gläsern der vier Gruppen wurden die bis zum 16. Tage nach Ansatz geschlüpften Fliegen der 1. Halbzeit und die in der Zeit vom 17. bis 36. Tag nach Ansatz geschlüpften Fliegen der 2. Halbzeit gesondert ausgezählt. Das Gesamtergebnis ist in Tab. II zusammengestellt.

In der 3. *Versuchsserie* wurde weitere 48 Zuchtgläser mit je 12 unbefruchteten *Attached-X*-Weibchen aus der Virginatorzucht sowie je 12 Wildtyp-Männchen aus der Nachkommenschaft der zweiten Serie versehen. Dabei wurden die Männchen in den je 12 Gläsern der neuen Versuchs- und Kontrollgruppen 3F₋, 3F₊, 3K' bzw. 3K'' aus den entsprechenden Gläsern der vorangegangenen Serie entnommen. Die Raumtemperatur lag weiterhin bei durchschnittlich etwa $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Durch aktive Raumluftkonvektion wurde eine Umkehrung des zuvor bestehenden Temperaturgefälles zwischen den Versuchsgruppen und den Kontrollgruppen erreicht. Die Zuchtgläser der vier Gruppen wurden am 9. Tag nach Ansatz, unmittelbar vor dem Schlüpfen der

Tab. II. Anzahl der männlichen und weiblichen Nachkommen in den Hauptversuchsgruppen.

2. SERIE $T_{\text{FELD}} > T_{\text{KONTR.}}$		♂ ♂	♀♀	Σ
FELD	2F—	6247	3779	10026
	2F+	6346	3917	10263
KONTR.	2K'	3967	2419	6386
	2K''	4005	2213	6218
Σ		20565	12328	32893

3. SERIE $T_{\text{FELD}} < T_{\text{KONTR.}}$		♂ ♂	♀♀	Σ
FELD	3F—	5967	3629	9596
	3F+	4872	2863	7735
KONTR.	3K'	7018	4244	11262
	3K''	7528	4800	12328
Σ		25385	15536	40921

Nachkommen ausgeschüttelt. Die Auszählung der Nachkommen in den Zuchtgläsern der vier Gruppen wurde in der Zeit vom 21. bis 48. Tag nach Ansatz in paralleler zeitlicher Folge vorgenommen. Das Auszählungsergebnis ist in Tab. II zusammengestellt.

Nach Beendigung der Feldversuche wurde ein weiterer Ansatz von 20 Zuchtgläsern mit je 10 *Attached-X*-Weibchen der Virginatorzucht sowie je 10 Wildtyp-Männchen aus der Nachkommenschaft der Gruppen 3F₊ (8 Gläser) und 3K'' (12 Gläser) zu gleichen Teilen auf zwei Behälter mit Durchschnittstemperaturen von 27,0 bzw. 24,8 °C verteilt, deren Temperaturdifferenz von 2,2 °C für die Dauer des Versuchs konstant gehalten wurde. Die Summe *S* der Nachkommen in den Zuchtgläsern der beiden Gruppen wurde in der Zeit vom 17. bis 44. Tag nach Ansatz in paralleler zeitlicher Folge ermittelt. Die Auswertung von insgesamt 29589 Fliegen hat innerhalb der Gruppen keine signifikanten Unterschiede in der Vermehrung der Nachkommen feldbehandelter und unbehandelter Männchen ergeben. Aus dem Unterschied zwischen den Gruppen wurde in beiden Fällen ein Nachkommenzuwachs von etwa 11%/°C ermittelt.

Ergebnisse

Das Auszählungsergebnis des Vorversuchs in Tab. I läßt ohne weitere Rechnung erhebliche Unterschiede in der Größe und Zusammensetzung der Feld- und Kontrollgruppe erkennen. Würde man unter Vernachlässigung der Streuung innerhalb der Gruppen den üblichen Kontingenztest auf das Aus-

zählungsergebnis anwenden, so wäre die *Zufallswahrscheinlichkeit* *P* für die beobachteten Unterschiede in der Gruppengröße *S* bzw. der Gruppenzusammensetzung *D/S* mit $\chi^2 = 203$ bzw. 78 bei einem Freiheitsgrad in beiden Fällen kleiner als 10⁻⁶%. Als Ergebnis dieses Versuchs, der nach Umfang und statistischer Beurteilung einigen Erhebungen auf diesem Gebiet gleichkommt, würde man z. B. eine hochsignifikante Einschränkung der Entwicklungsfähigkeit der Fliegen im magnetischen Wechselfeld von 9,6 kHz feststellen. Zu realistischeren Zufallswahrscheinlichkeiten gelangt man dagegen durch Berücksichtigung der in Abb. 1 veranschau-

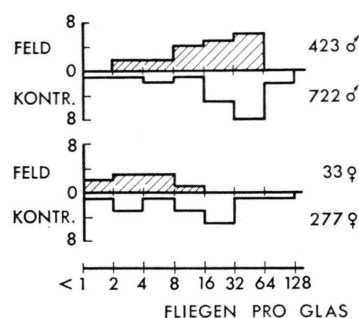


Abb. 1. Streuung der Nachkommenzahlen in den Zuchtgläsern des Vorversuchs bei unvollständiger Entwicklung eines kälteempfindlichen Fliegenstamms.

lichten Streuung *innerhalb* der Gruppen. Die Varianzanalyse liefert in diesem Fall für die beobachteten Zahlenunterschiede *zwischen* den Gruppen der im Feld bzw. unter Kontrollbedingungen erhaltenen Nachkommen $P = 1,9\%$ (♂ ♂ + ♀♀), $P = 5,4\%$ (♂ ♂) bzw. $P = 0,64\%$ (♀♀). Dieses Ergebnis deutet auf mögliche systematische Gruppenunterschiede hin, die aber keineswegs einen Schluß auf die Existenz von Magnetfeldeffekten zulassen. Nach Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 6 °C setzte in 17 von 20 Gläsern der Feldgruppe 1F_— und in 15 von 20 Gläsern der Kontrollgruppe 1K eine lebhaftere Nachkommenentwicklung ein. Das schlechtere „Angehen“ der Kontrollgläser erwies sich im χ^2 -Test als nicht signifikant. Bereits 7 Tage nach Erhöhung der Temperatur hatten beide Gruppen annähernd gleiche Größe und Zusammensetzung erreicht.

Aufgrund des 50mal größeren Versuchsmaterials der Hauptserien 2 und 3 lassen sich die im Vorversuch gefundenen Gruppenunterschiede vollständig mit dem unterschiedlichen Verlauf der für die Ent-

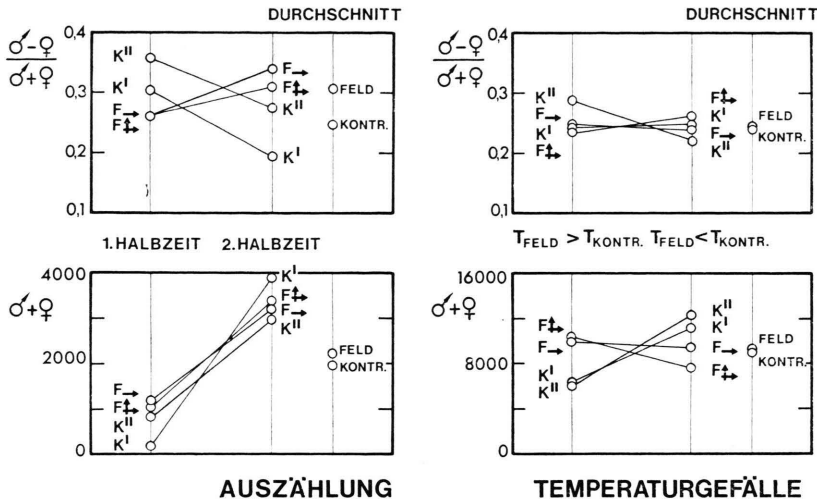


Abb. 2. Einfluss eines Temperaturgefälles von 3–4 °C auf die Zusammensetzung und Größe der Nachkommenschaft in den Feldgruppen F und in den Kontrollgruppen K. Links: Änderung der Gruppenzusammensetzung D/S im Verlauf der Nachkommenentwicklung. Teilergebnisse der 1. und 2. Halbzeit, ermittelt durch entsprechende Auszählung von 24 Zuchtgläsern einer Versuchsreihe mit erhöhter Temperatur im Feldbereich. Rechts: Zunahme der Gruppengröße S mit der Aufzuchttemperatur. Endergebnisse, ermittelt durch Auszählung von insgesamt 128 Zuchtgläsern aus je einer Versuchsreihe mit erhöhter Temperatur im Feld- bzw. Kontrollbereich.

wicklung der Fliegen kritisch gewählten Durchschnittstemperatur von 16 ± 4 °C im Feldbereich und im Kontrollbereich des gemeinsamen Versuchsrums erklären. Die Versuche der Hauptserien wurden bei einer mittleren Raumtemperatur von 22 ± 2 °C durchgeführt, von der die Durchschnittstemperaturen der Teilgruppen um etwa 1,7 °C nach oben (2F, 3K) bzw. unten (2K, 3F) abwichen. Die Versuchsergebnisse in Abb. 2 veranschaulichen die Auswirkung des Temperaturunterschieds auf die Zusammensetzung D/S und Größe S der Feld- und Kontrollgruppen. Die linke Seite der Abbildung zeigt die unterschiedlichen Beiträge der Fliegen, die im Verlauf der 1. bzw. 2. Versuchshalbzeit in je 6 Gläsern der verschiedenen Feld- und Kontrollgruppen der 2. Versuchsserie geschlüpft sind. Im oberen Diagramm ist deutlich zu erkennen, daß sich die Zusammensetzung der Gruppen im Verlauf des Versuchs ändert und daß der gegensätzliche Trend zu einer Umkehrung des Unterschieds zwischen den Feld- bzw. Kontrollgruppen führt. Dieser Befund läßt sich qualitativ aus dem Temperaturunterschied zwischen den Gruppen erklären. Er ist dagegen nicht mit einer einseitig gerichteten Änderung der Zusammensetzung durch die magnetischen Wechselfelder vereinbar. Die rechte Seite der Abbildung zeigt das Gesamtergebnis der Gruppenauswertung unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Temperaturgefälles in den Serien 2 und 3. Während die Endzusammensetzung der Gruppen annähernd temperaturkonstant ist, ergeben sich aus der Temperaturdifferenz die erwarteten Unterschiede von etwa $\pm 19\%$ der mittleren Ausbeute. Die Umkehrung des

Größenunterschieds der Feld- und Kontrollgruppen ist ebenfalls nicht mit einem einseitig gerichteten Einfluß der magnetischen Wechselfelder auf die Anzahl der entwicklungsfähigen Nachkommen vereinbar.

Als weiteren feldunabhängigen Nebeneffekt lassen die vorliegenden Ergebnisse einen schwach korrelierten signifikanten Zusammenhang zwischen Gruppenzusammensetzung und Gruppengröße innerhalb der Zuchtgläser erkennen. In Abb. 3 ist die Zusammensetzung als Funktion der Fliegenzahlen in den Zuchtgläsern der Feld- und Kontrollgruppen der Serien 2 und 3 dargestellt. Der eingezeichnete ungewichtete Mittelwert, die Regressionsgerade und die Vertrauensgrenzen wurden aus der vereinigten Datenmenge ermittelt. Bezeichnet D die Differenz und S die Summe der männlichen und weiblichen Nachkommenzahlen, so ist der Verlauf der Regressionsgeraden durch

$$D/S = a_0 - a_1 S$$

mit den Koeffizienten $a_0 = 0,329$ und $a_1 = 0,000106$ gegeben. Aus $D = a_0 S - a_1 S^2$ folgt die Zusammensetzung des Zuwachses dS in Zuchtgläsern mit S Fliegen

$$dD/dS = a_0 - 2 a_1 S.$$

Für Besetzungsdichten zwischen 0–2000 Fliegen pro Glas liegt demnach die Zusammensetzung des Zuwachses zwischen den Werten $+0,33$ und $-0,10$, wobei jede geschlüpfte Fliege eine Abnahme um durchschnittlich $2,1 \cdot 10^{-4}$ zu bewirken scheint. In den vorliegenden Versuchen war die Abnahme pro

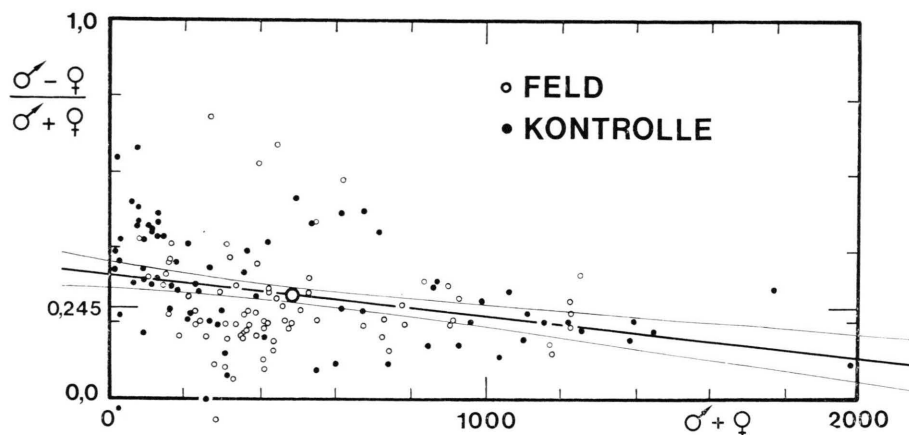


Abb. 3.
Zusammensetzung D/S der Nachkommenschaft in Abhängigkeit von der Populationsdichte S bei Auszählung der Zuchtgläser. Die Vertrauensgeraden entsprechen den Standardfehlern der Koeffizienten a_0 und a_1 .

Fliege bei den Kontrollgruppen überdurchschnittlich ($2,6 \cdot 10^{-4}$), bei den Feldgruppen dagegen unterdurchschnittlich ($0,75 \cdot 10^{-4}$). Die physiologischen Grundlagen des Effekts sind den Versuchsergebnissen nicht zu entnehmen.

Die Voruntersuchungen haben gezeigt, daß die Auszählungsergebnisse von Versuchsreihen zur Bestimmung der Entwicklungs- und Erbschäden erhebliche Effekte vortäuschen können. Eine zuverlässige Interpretation der Gruppengröße erfordert die Berücksichtigung des Ausbeutezuwachses mit der Umgebungstemperatur. Eine zuverlässige Interpretation der Gruppenzusammensetzung ist wegen des unterschiedlichen temperaturabhängigen Zeitverlaufs der Entwicklung von Männchen und Weibchen nur bei vollständiger Auszählung von mindestens einer Nachkommengeneration möglich. Dabei kann die Abnahme der Gruppenzusammensetzung mit steigender Populationsdichte zu systematischen Fehlern führen. Bei der statistischen Behandlung der Ergebnisse muß auch die Streuung innerhalb der Gruppen in die Rechnung einbezogen werden. Die Vernachlässigung von Nebeneffekten und Fehlinterpretation von Auszählungsergebnissen kann zu Widersprüchen in den Berichten über die biologische Wirksamkeit von Magnetfeldern beigetragen haben.

Aus den Durchschnittswerten auf der rechten Seite der Abb. 2 war bereits zu ersehen, daß die Gruppenzusammensetzung und Gruppengröße der vereinigten Versuchsserien 2 und 3 im magnetischen Wechselfeld und unter Kontrollbedingungen vergleichbare Werte annehmen. Entsprechend liefert die Varianzanalyse für die unterschiedlichen Auszählungsergebnisse der drei Gruppen $2,3F_-$, $2,3F_+$ und $2,3K^{++}$ ohne Berücksichtigung des gemein-

samen zeitlichen Trends innerhalb der Gruppen die sehr hohen Wahrscheinlichkeiten $P = 85\%$ ($\sigma\sigma + \varphi\varphi$), $P = 85\%$ ($\sigma\sigma$) bzw. $P = 87\%$ ($\varphi\varphi$) für das zufällige Auftreten gleicher oder größerer Abweichung zwischen den Gruppen, wenn die verwendeten Felder als wirkungslos angenommen werden. Ein statistischer Vergleich der in Tab. III zusammen-

Tab. III. Größe S und Zusammensetzung D/S der Fliegenzuchten in nicht rotierenden (F_-) und rotierenden (F_+) Wechselfeldern.

SERIE 2-3		F_-	F_+
FELD	$\sigma\sigma$	12214	11218
	$\varphi\varphi$	7408	6780
	S	19622	17998
	D/S	0,2449	0,2466
	$\sigma\sigma/\varphi\varphi$	1,649	1,655

gestellten Auszählungsergebnisse der beiden Feldgruppen $2,3F_-$ und $2,3F_+$ liefert mit $P = 53\%$ ($\sigma\sigma + \varphi\varphi$), $P = 53\%$ ($\sigma\sigma$) bzw. $P = 54\%$ ($\varphi\varphi$) ebenfalls sehr hohe Zufallswahrscheinlichkeiten. Eine besondere Wirkung der verdoppelten Feldstärke, der Feldrotation und des Oberwellenspektrums der Pulsfrequenz bei den F_+ -Gruppen ist nach den vorliegenden Ergebnissen nicht zu erwarten. Die Auszählungsergebnisse der Feldgruppen lassen sich daher zusammenfassen und mit dem Auszählungsergebnis der Kontrollgruppen vergleichen (Tab. IV). Die hohen Zufallswahrscheinlichkeiten $P = 77\%$ ($\sigma\sigma + \varphi\varphi$), $P = 75\%$ ($\sigma\sigma$) bzw. $P = 79\%$ ($\varphi\varphi$) zeigen, daß bei diesem Vergleich keine Anzeichen für eine biologische Wirksamkeit der verwendeten magnetischen Wechselfelder zu er-

Tab. IV. Größe *S* und Zusammensetzung *D/S* von feldbehandelten und unbehandelten Fliegenzuchten bei unterschiedlicher Aufzuchttemperatur.

SERIE 2—3	20,3 °C	23,7 °C	GESAMT
FELDER ♂♂	10839	12593	23432
♀♀	6492	7696	14188
<i>S</i>	17331	20289	37620
<i>D/S</i>	0,2508	0,2414	0,2457
♂♂/♀♀	1,670	1,636	1,652
KONTR. ♂♂	7972	14546	22518
♀♀	4632	9044	13676
<i>S</i>	12604	23590	36194
<i>D/S</i>	0,2650	0,2332	0,2443
♂♂/♀♀	1,721	1,608	1,647
GESAMT ♂♂	18811	27139	45950
♀♀	11124	16740	27864
<i>S</i>	29935	43879	73814
<i>D/S</i>	0,2568	0,2370	0,2450
♂♂/♀♀	1,691	1,621	1,649

kennen sind. Die höhere Ausbeute und der höhere Männchenanteil bei den Feldgruppen sind statistisch unsignifikant und liegen weit innerhalb des Rahmens der durch Temperaturänderung bzw. Populationsdichteänderung verursachten Effekte. Entsprechende Unterschiede der Gruppengröße und der Gruppenzusammensetzung sind aufgrund der vorliegenden Untersuchungen zu erwarten, wenn die Feldgruppen gegenüber den Kontrollgruppen bei einer um durchschnittlich 0,4 °C erhöhten Zuchttemperatur bzw. einer um durchschnittlich 1% erniedrigten Populationsdichte in den Zuchtgläsern aufgezogen werden. Erwartungsgemäß ergeben die Versuchsdaten signifikante Größenunterschiede beim Vergleich aller Gruppen, die sich bei Durchschnittstemperaturen von etwa 20,3 °C bzw. 23,7 °C entwickelt haben. Die Zufallswahrscheinlichkeiten liegen in diesem Fall bei $P = 0,32\%$ (♂♂ + ♀♀), $P = 0,36\%$ (♂♂) bzw. $P = 0,36\%$ (♀♀).

Unter Berücksichtigung des gemeinsamen zeitlichen Trends der Auszählungsergebnisse innerhalb der Gruppen lassen sich die *Vertrauensgrenzen* für die vermutete Unschädlichkeit der verwendeten Wechselfelder angeben. Die Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen dieser Vermutung wird im vorliegenden Fall kleiner als 95%, wenn die Feld- und Kontrollgruppen beim Vergleich der Größe *S* bzw. der Zusammensetzung *D/S* um mehr als $\pm 8\%$ vom gemeinsamen Mittelwert abweichen. Magnetfeldwirkungen innerhalb dieses Bereichs können durch die vorliegende Untersuchung nicht ausgeschlossen werden.

Diskussion

Bei der Untersuchung der biologischen Verträglichkeit von Magnetfeldern für den Menschen ist die Unterscheidung zwischen kurzfristigen Gesundheitsstörungen und langfristigen Gesundheitsschäden zweckmäßig. Kurzfristige Gesundheitsstörungen sind im allgemeinen mit ärztlichen Untersuchungsmethoden feststellbar. Im Bereich starker niederfrequenter Wechselfelder wurden z. B. Wirkungen beobachtet, die einer gesundheitlichen Störung durch Lärmbelastung vergleichbar erscheinen^{1, 25, 26}. Aussagen über langfristige Gesundheitsschäden durch Feldwirkung auf die Entwicklungsfähigkeit und die Erbanlagen sind dagegen mit den diagnostischen Mitteln der Humanmedizin kaum zu gewinnen. Man ist hier auf Tierversuche mit schnellem Generationenwechsel angewiesen, deren Ergebnisse auch bei Beseitigung der bestehenden Widersprüche nur mit erheblichen Einschränkungen auf den Menschen übertragen werden können. Eine gewisse Analogie im chemischen Aufbau der Erbsubstanz und der Zellorganellen von Mensch und Fliege erlaubt vorsichtige Schlüsse auf die beim Menschen zu erwartenden Langzeiteffekte der verwendeten Felder. Berücksichtigt man, daß die Erbanlagen des Menschen im Vergleich zur Fliege vermutlich 10- bis 1000mal mehr Gene aufweisen, die etwa 10- bis 1000mal besser geschützt zu sein scheinen^{27, 28}, so wird man schädliche Genmutationen unter gleichen Bedingungen bei Mensch und Fliege mit etwa gleicher zeitlicher Häufigkeit erwarten. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen keine Hinweise auf eine akute genetische Belastung des Menschen bei vorübergehendem Aufenthalt in den verwendeten niederfrequenten Magnetfeldern. Die Untersuchung des Einflusses dieser Felder auf die Spontanmutationsraten der Gene von leicht identifizierbaren äußeren Fliegenmerkmalen würde eine methodisch unabhängige Überprüfung der Schlußfolgerungen dieser Arbeit ermöglichen.

Das Untersuchungsprogramm wurde mit finanzieller Unterstützung der Bizerba-Werke Wilhelm Kraut AG, Balingen, durchgeführt. Prof. M. Heisenberg verdanken wir wichtige Anregungen. Dank gebührt auch Herrn H. Braun und Herrn M. Herre für ihre Hilfe in technischen Fragen, Frl. M. Föger für die Vorbereitung der Zuchten sowie Frl. C. Hanser und Herrn R. Biesinger für die Bearbeitung des Manuskripts und die Zeichnungen.

- ¹ A. S. Presman, *Electromagnetic Fields and Life*, Plenum Press, New York 1970.
- ² S. Mittler, *Mutat. Res.* **31**, 316 [1973].
- ³ M. F. Barnothy, *Biological Effects of Magnetic Fields*, Bd. I, Plenum Press, New York 1964.
- ⁴ M. F. Barnothy, *Biological Effects of Magnetic Fields*, Bd. II, Plenum Press, New York 1969.
- ⁵ M. A. Persinger, *ELF and VLF Electromagnetic Field Effects*, Plenum Press, New York 1974.
- ⁶ H. L. König, *Unsichtbare Umwelt*, Heinz Moos Verlag, München 1975.
- ⁷ A. Forssberg, *Acta Radiologica* **21**, 213 [1940].
- ⁸ S. Mittler, *Mutat. Res.* **13**, 287 [1971].
- ⁹ S. Mittler, *J. Heredity* **64**, 233 [1973].
- ¹⁰ R. Tischner u. K. Bittel, *Mesmer und sein Problem*, Stuttgart 1941.
- ¹¹ U. Sh. Akhmerov *et al.*, *Proceedings of Conference on the Effect of Magnetic Fields on Biological Objects*, S. 10, Moskau 1966.
- ¹² V. G. Shakhbazov *et al.*, *ibid.*, S. 84.
- ¹³ H. B. Steen u. P. Oftedal, *Experientia* **23**, 814 [1967].
- ¹⁴ W. C. Levengood, *Nature* **209**, 1009 [1966].
- ¹⁵ W. C. Levengood, *Biophysical Journ.* **7**, 297 [1967].
- ¹⁶ N. A. Posch, *Dissertation Abstr.* **31**, 3873-B [1971].
- ¹⁷ S. Chevais u. P. Manigault, *Compt. Rend.* **214**, 919 [1942].
- ¹⁸ I. L. Mulay u. L. N. Mulay, *Biological Effects of Magnetic Fields* (M. F. Barnothy, Hrsg.), **Bd. I**, S. 146, Plenum Press, New York 1964.
- ¹⁹ D. E. Beischer, *ibid.* **Bd. I**, S. 201.
- ²⁰ T. R. Tegenkamp, *Biological Effects of Magnetic Fields* (M. F. Barnothy, Hrsg.), **Bd. II**, S. 189, Plenum Press, New York 1969.
- ²¹ S. Mittler, *Genetics* **74**, Suppl. 183 [1973].
- ²² J. Heller u. G. Mickey, *Digest Internatl. Conf. Electronics* **21**, 2 [1961].
- ²³ G. Mickey, *N. Y. State, J. Med.* **63**, 1935 [1963].
- ²⁴ V. Finnerty, D. L. Baillie u. A. Chovnick, *Drosophila Inf. Serv.* **45**, 190 [1970].
- ²⁵ A. Frey, *Naval Res. Rev.* **16**, 1 [1963].
- ²⁶ C. Wieske, *Biomedical Sciences Instrumentation*, **Bd. I**, S. 467, Plenum Press, New York 1963.
- ²⁷ J. V. Neel u. W. J. Schull, *Human Heredity*, Univ. of Chicago Press, Chicago 1954.
- ²⁸ Th. Dobzhansky u. B. Spassky, *Genetics* **39**, 899 [1954].