

Anregung von subjektiven Lichterscheinungen (Phosphenen) beim Menschen durch magnetische Sinusfelder

D. SEIDEL, M. KNOLL und J. EICHMEIER

Institut für Technische Elektronik der Technischen Hochschule München

Eingegangen am 20. September 1967

Excitation of Subjective Light Patterns (Phosphenes) in Humans by Sinusoidal Magnetic Fields

Summary. Subjective light patterns which appear “spontaneously” or as a result of electrical impulse stimulation are known as phosphenes. The patterns produced by electrical stimulation can be divided into about 15 different groups which all represent elementary geometrical forms. It is shown in this paper that by means of a coil which is placed around the head phosphenes can be stimulated by magnetic induction also. In the encephalographic frequency range the necessary induction is about 200 to 1000 Gauss.

30 test-subjects (students) observed 39 patterns which are identical with geometrical phosphenes from groups already known from electrical stimulation experiments [14]. However, there is a difference between the percentual occurrence of magnetic and electrical patterns. Similar results have been found in a second professional group of subjects (20 air force pilot applicants). The measured parameters of stimulation define a “range of stimulation” or a “range of existence” of magnetic phosphenes which is analogous to the “range of existence” for electrical phosphenes.

Considerations about the conductivity-distribution in a model of the head make it probable that an increase in density of induced stimulation currents near good-conducting media (for instance near the bulbi and, therefore, near the retina) might be the reason for the magnetic stimulation of phosphenes.

Key-Words: Light Patterns, Subjective — Phosphenes — Magnetic Fields, Sinusoidal.

Zusammenfassung. Spontane oder durch elektrische Impulsreizung bei geschlossenen Augen auftretende subjektive Lichterscheinungen sind als Phosphene bekannt; die bei elektrischer Anregung vorkommenden Formen lassen sich in etwa 15 verschiedene Gruppen einteilen, die sämtlich einfache geometrische Muster darstellen. Es wird gezeigt, daß mittels einer in Kopfnähe angebrachten Reizspule auch durch magnetische Induktion Phosphene angeregt werden können, wobei die nötige Induktion im encephalographischen Frequenzbereich etwa 200—1000 Gauß beträgt. Die mit 30 Vpn (Studenten) gefundenen 39 Muster sind sämtlich mit geometrischen Phosphenformen identisch, die schon von elektrischen Reizversuchen her bekannt sind [14]; jedoch ist die prozentuale Häufigkeit der magnetischen Muster von der der elektrischen Muster verschieden. Eine zweite Gruppe von Versuchspersonen (20 Pilotenanwärter) zeigt ähnliche Resultate. Die gemessenen Reizparameter definie-

ren einen Anregungs- oder Existenzbereich magnetischer Phosphene, der dem Existenzbereich elektrischer Phosphene [22, 23] analog ist.

Eine Betrachtung der Leitfähigkeitsverteilung im Schädelmodell führt zu der Vermutung, daß als Ursache für die magnetische Phosphenanregung eine Dichteerhöhung der induzierten Reizströme in der Nähe gut leitender Medien (z. B. der Bulbi und damit der Retina) in Frage kommt.

Schlüsselwörter: Lichterscheinungen, subjektive — Phosphene — Magnetfelder, sinusförmige.

I. Einleitung

Bekanntlich werden von vielen Menschen beim Anlegen schwacher elektrischer Impulsfelder ($E \lesssim 1 V_{\text{eff}}/\text{cm}$) an den Kopf mit geschlossenen Augen im encephalographischen Frequenzbereich einfache geometrische Figuren wahrgenommen. Diese gleichen hellen Strichzeichnungen auf dunklem Hintergrund, wie sie aus der Psychologie als Antwort auf adäquate Reize schon bekannt sind und dort als „Phosphene“ bezeichnet werden [9—12, 14]. Ihre Form und ihr Auftreten sind von der verwendeten Impulsfrequenz („Reizfrequenz“) abhängig; jedoch sind die bei verschiedenen Versuchspersonen mit der gleichen Frequenz angeregten Formen nicht dieselben. Der elektrische Reizstrom (Impulsstrom-Amplitude: 10^{-3} — 10^{-5} A) wird meist durch an der Stirn befestigte Elektroden zugeführt. Wegen ihrer Abhängigkeit von äußeren elektrischen (inadäquaten) Reizen bezeichnen wir solche subjektiven Lichterscheinungen hier als „elektrische Phosphene“.

Die Bandbreite der Anregungsfrequenzen einzelner elektrischer Phosphene kann so schmal sein¹, daß eine Versuchsperson (Vp) im Frequenzbereich von 2—50 Hz nacheinander bis zu etwa 20 von ihnen reproduzierbar trennen kann. Angaben über die Häufigkeit solcher Phosphenformen in einer gemischten Bevölkerungsgruppe von 373 Vpn und ihre Form-Variationsbreite finden sich im Höfer-Knollschen Phosphen-Linnäus [9]. Überlegungen zum Entstehungsmechanismus der elektrischen Phosphene finden sich bei [13] und [14].

Zur Aufstellung eines befriedigenden Modells für das Entstehen von Phosphenen erschien es wünschenswert, festzustellen, ob analog zum elektrischen Fall auch dann Phosphene angeregt werden, wenn der menschliche Kopf sich in einem *magnetischen* Wechselfeld befindet, und bejahendenfalls, welche Formen solche „magnetischen Phosphene“ aufweisen. Eine solche Anregung könnte durch den Hall-Effekt [15] oder (sehr viel wahrscheinlicher) durch magnetische Induktion erfolgen. Im letzteren Falle könnten die Induktionsströme z. B. die Ganglienschicht der Retina radial durchsetzen, wie dies etwa bei der Anordnung zur elektrischen

¹ Praktisch weniger als $\pm 10\%$ der mittleren Anregungsfrequenz. Doch werden gelegentlich auch Phosphene mit Bandbreiten bis zu $\pm 40\%$ der mittleren Anregungsfrequenz gefunden.

Phosphenreizung mit kalottenförmigen Bindehaut-Elektroden nach BRINDLEY [3] der Fall ist.

II. Die Anregbarkeit magnetischer Phosphene

Für den Nachweis magnetischer Phosphene haben schon 1911 MAGNUSSON u. STEVENS [16,17] einen wesentlichen Beitrag geleistet. Diese Autoren konnten mit einem sinusförmigen Magnetfeld von 7–70 Hz und über 1000 Gauß Amplitude (neben blitzartigem Aufleuchten) Helligkeitsschwankungen entsprechend der Anregungsfrequenz über das ganze Gesichtsfeld beobachten. Bei einer Anregungsfrequenz von 21,3 Hz wurden auch geformte Phosphene, nämlich Gittermuster, gesehen. Bestätigungen von anderen Autoren hierfür liegen bisher nicht vor. SOLOVJEV [23], der 1964 impulsförmige Magnetfelder zur Anregung von Lichterscheinungen benutzte, konnte im encephalographischen Frequenzbereich nur Flimmer-Frequenzbänder, aber keine geformten Phosphene entdecken. Auch in der zahlreichen Literatur über den Einfluß magnetischer Felder auf den Sehapparat [1,2,4,6–8,18,19,24] wird nichts über die Beobachtung geformter Phosphene berichtet. Über den Einfluß magnetischer Felder auf den motorischen Apparat berichtet RENTSCH [21].

Eine Abschätzung der im Kopf einer Vp induzierten Reizströme (identisch mit den „Wirbelströmen“ der Elektrotechnik) zeigt, daß wegen der relativ geringen Leitfähigkeit des Schädels ($\sim 2 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ bei bitemporaler Elektrodenlage) und des Lumbal-Liquors ($0,015 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ nach [5]) die Eindringtiefe des reizenden Magnetfeldes selbst an der oberen Grenze des encephalographischen Frequenzbereichs (etwa 30 Hz) immer noch wesentlich größer ist als der Schädeldurchmesser. Die magnetischen Kraftlinien einer über den Schädel geschobenen Kreisleiter-Reizspule verlaufen also im allgemeinen im Schädel ähnlich wie in Luft und induzieren auch in der Tiefe des Schädels den gleichen Spannungsbetrag ΔU_{eff} wie in Luft. Für eine Induktionsschleife von 15 cm Durchmesser [23] ergibt sich ΔU_{eff} zu etwa 0,39 Volt bei 50 Hz und 1000 Gauß — ein Wert, der wesentlich über dem Bereich des Pegels der von den Nerven-netzwerken spontan produzierten Aktionspotentiale liegt (0,09–0,11 Volt). Nach dieser Sachlage wird die maximale Reizstromdichte zur Anregung magnetischer Phosphene innerhalb gut leitender Bereiche des Schädels z.B. der Bulbi zu erwarten sein. Daß diese höhere Dichte des induzierten Reizstromes noch dazu in Oberflächennähe der Bulbi, also nahe den Ganglienzellen der Netzhaut auftritt, bedeutet eine weitere Erhöhung der Reizstromdichte am Angriffspunkt der magnetischen Anregung verschiedener Phosphenformen. Nach diesen Überlegungen erschien es aussichtsvoll, mit einer Versuchsanordnung ähnlich der von MAGNUSSON u. STEVENS das eventuelle Auftreten geformter Phosphene an einer größeren Personengruppe (30 Vpn) zu untersuchen.

III. Versuchsanordnung

Für die Anregung von Phosphenen wird der Kopf der V_p von einer kreisförmigen Reizspule umgeben. Diese wird von Kupferschienen, die zugleich die Stromzuführung der Reizspule darstellen, in Augenhöhe der V_p gehalten. Um auch bei abgedunkeltem Raum geringste Lichteinwirkungen von außen zu vermeiden, sind die Augen der V_p mit einer Schlafbrille geschützt. Die Phosphenuntersuchungen wurden also stets bei Dunkeladaptation durchgeführt.

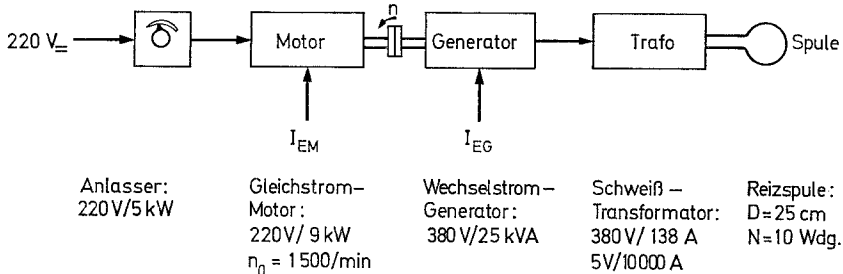


Abb.1. Blockschaltbild der Anordnung für die magnetisch-induktive Anregung von Phosphenen

Die Reizspule ist an die Sekundärwicklung eines Schweißtransformators angeschlossen, dessen Primärspannung durch einen Motor-Generator-Satz erzeugt wird. Das Blockschaltbild dieser Geräteanordnung zur Erzeugung eines sinusförmigen Magnetfeldes veränderlicher Frequenz zeigt Abb.1. Die Frequenz des anregenden Magnetfeldes wird durch die Drehzahl eines Gleichstrommotors bestimmt, die durch Veränderung des Anker- und Erregerstromes des Motors in einfacher Weise variiert werden kann. Die Nenndrehzahl des Motors beträgt 1500 U/min, die eine Nennfrequenz des Generators von 50 Hz entspricht.

Da die Drehzahl der verwendeten Maschinen bis zu 20% über ihrer Nenndrehzahl liegen kann, beträgt die höchste Frequenz des anregenden Magnetfeldes 60 Hz. Während der Phosphenuntersuchungen bleibt die Erregung des Wechselstromgenerators konstant, so daß nach dem Induktionsgesetz die Durchflutung der Reizspule mit der Frequenz zunimmt. Bei Frequenzen oberhalb 45 Hz bleibt die Durchflutung der Reizspule wegen des anwachsenden Streufeldes des Transformators bei zunehmender Belastung und des mit der Frequenz ansteigenden Wechselstromwiderstandes der Reizspule nahezu konstant.

IV. Versuchsergebnisse

Abb.2 zeigt übereinander die Phosphen-Spektrogramme von 30 Versuchspersonen (Studenten) als Funktion der Anregungsfrequenz, worin die Flimmerfrequenzbänder mit F und die Anregungsfrequenzbänder mit






















Vp. - Nr.	f. [Hz]	
1	10	— F —
2	20	F
3	30	— F — 
4	40	≡ ≡ — F —
5	50	— F — F ≡ F
6	60	F —  — — F —
7	70	— F —  F
8		 F
9		○ — F — — F —
10		F —  — F
11		—  — — F —
12		F F
13		— F —)  
14		F —  — ()  — F —
15		≡  — — F —
16		—  — F 
17		—  — — F —
18		∞ ≡ ≡ F
19		⊙ F ⊙
20		≡ ≡ 
21		
22		 — F — F ≡ ≡
23		F — F —
24		— F —
25		— F — 
26		F — F — F
27		≈ F)))
28		 — F —
29		—  — ≈
30		F  F 

Abb. 2. Frequenzspektrum der magnetisch angeregten Phosphene bei 30 Vpn (Studenten) [23]. Rechte Spalte: Zahl der individuellen Phosphenformen

der betreffenden Phosphenform bezeichnet sind. Die Breite dieser Phosphenform entspricht dabei etwa der Breite des jeweiligen Frequenzbandes, sofern diese nicht (bei breiteren Frequenzbändern) durch einen horizontalen Strich gekennzeichnet ist. Man erkennt insgesamt 39 geformte Phosphene (von denen 30, also 75%, schmalbandig sind) und etwa ebenso viele (ungeformte) Flimmer-Phosphene *F*. Die Hälfte aller im

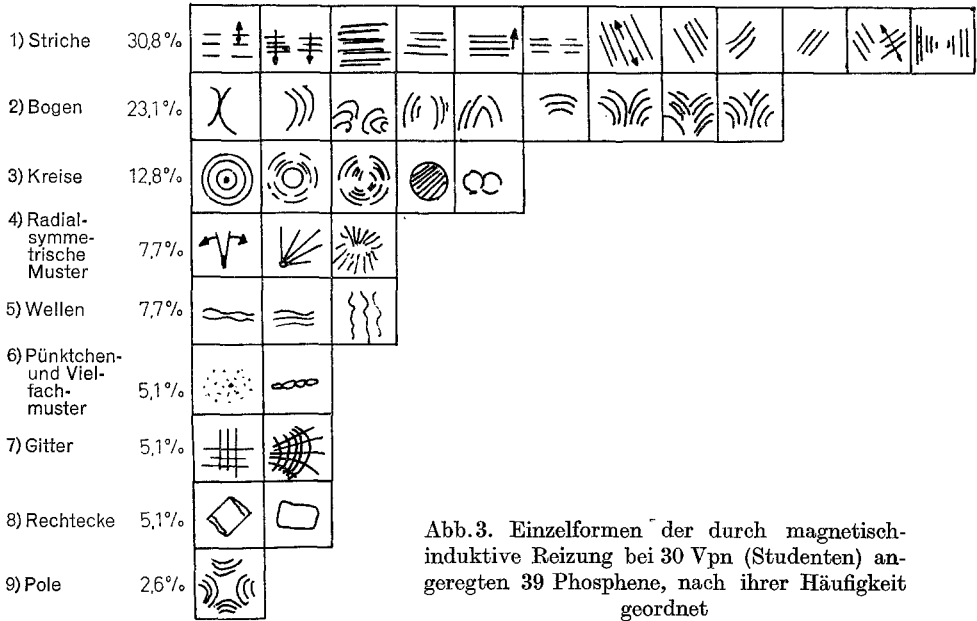


Abb.3. Einzelformen der durch magnetisch-induktive Reizung bei 30 Vpn (Studenten) angeregten 39 Phosphene, nach ihrer Häufigkeit geordnet

sinusförmigen Magnetfeld angeregten Phosphene ist also geformt, während bei elektrischer Anregung mit Sinusströmen und 20 Vpn nur 6 von 38, d. h. nur 15% geformte Phosphene gefunden wurden [9]. Jedoch ergab die Anregung mit elektrischen Impulsen einen wesentlich höheren Prozentsatz geformter Phosphene, nämlich 65% [9].

Abb.3 zeigt eine Übersicht über die bei magnetischer Anregung in der Studentengruppe gefundenen Phosphenformen, geordnet nach der Häufigkeit ihres Vorkommens. Man kann feststellen, daß alle neun Formgruppen auch in den etwa 15 Formgruppen vorkommen, die von der elektrischen Anregung her bekannt sind [9]. Jedoch ist die Reihenfolge der Häufigkeit eine andere:

Bei der magnetischen Anregung stehen Strichfiguren, bei der elektrischen dagegen Kreisbogen an der Spitze². Doch ist die Zahl der Vpn

² Dies stimmt mit der Tatsache überein, daß MAGNUSSON u. STEVENS nur Strichfiguren als Phosphene beobachteten.

noch zu klein, um über die Häufigkeitsverteilung der Phosphphenformen eine endgültige Aussage machen zu können. Spiralen, Dreiecke, Zackenmuster, Kugelstiele und Fischgrätenmuster kommen bei den untersuchten Versuchsgruppen mit magnetischer Anregung nicht vor. Bei einer anderen Gruppe von Vpn (20 Pilotenanwärter) ergaben sich folgende Häufigkeitswerte: Kreise 30%, Wellen 25%, Bogen 15%, Striche 15% und Gitter 15%.

V. Anregungs- oder Existenzbereich elektrischer und magnetischer Phosphene

Es ist zu erwarten, daß die elektrische oder magnetisch-induktive Anregung von Phosphenen nicht bei beliebigen Werten der Reizparameter (z. B. Anregungsfrequenz, Tastverhältnis, Impulsdauer, Pausendauer, Reizstromamplitude) erfolgen kann, sondern nur in bestimmten Bereichen dieser Werte, die sich empirisch feststellen lassen (Anregungs- oder Existenzbereiche der Phosphene). Über Einzelheiten vgl. [22] und [23].

Daß MAGNUSSON u. STEVENS nur eine Form von magnetischen Phosphenen fanden, nämlich Strichfiguren, könnte entweder auf eine zu geringe Zahl von Beobachtungen oder darauf zurückzuführen sein, daß sie nicht den ganzen Anregungsbereich untersuchten.

Die Arbeit wurde im Institut für Technische Elektronik der TH München (Leiter Prof. Dr. R. MÜLLER) durchgeführt.

Wir danken Herrn Dozenten Dr. J. KUGLER (Universitäts-Nervenklinik) sowie Herrn Dr. A. REIS (TH München) für medizinische und Herrn Prof. MÜLLER-LIMMROTH (TH München) für physiologische Ratschläge, ferner Herrn Generalarzt Dr. LAUSCHNER und seinen Mitarbeitern vom Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe in Fürstenfeldbruck für die freundliche Zusammenarbeit, insbesondere bei den Piloten-Versuchsreihen. Ebenfalls danken wir Herrn Prof. Dr. SCHEURING (TH München) für die Überlassung elektrischer Maschinen und den Mitarbeitern des Instituts für Technische Elektronik an diesem Programm für viele anregende Diskussionen.

Literatur

1. BARLOW, H. B., and E. G. WALSH: Visual sensation aroused by magnetic fields. *Amer. J. Physiol.* **148**, 372—375 (1917).
2. BEER, B.: Über das Auftreten einer subjektiven Lichtempfindung im magnetischen Felde. *Wien. klin. Wschr.* **15**, 108—109 (1902).
3. BRINDLEY, G. S.: The site of electrical excitation of the human eye. *J. Physiol. (Lond.)* **127**, 189—200 (1955).
4. DANILEWSKI, B.: Beobachtungen über eine subjektive Lichtempfindung im variablen magnetischen Felde. *Arch. Anat. Physiol.* **5**, 513—518 (1905).
5. DOCUMENTA GEIGY: Wissenschaftliche Tabellen, 1960.
6. DUNLAP, K.: Visual sensations from an alternating magnetic field. *Science* **33**, 68—71 (1911).
7. FLEISCHMANN, L.: Gesundheitsschädlichkeit der Magnet-Wechselfelder. *Naturwissenschaften* **10**, 434 (1922).
8. FRANKENHÄUSER, F.: Über einen Versuch zur Einführung des Magneten in die Therapie. *Z. physik. u. diät. Ther.* **6**, 52—55 (1902).

- 18 D. SEIDEL et al.: Anregung von Phosphenen durch magnetische Sinusfelder
9. HÖFER, O.: Über die Abhängigkeit elektrisch induzierter, subjektiver Muster (Phosphene) vom zeitlichen Verlauf der anregenden Wechselströme. *Elektromedizin* 8, Nr. 2, 72—88 (1963).
 10. KNOLL, M.: Anregung geometrischer Figuren und anderer subjektiver Lichtmuster in elektrischen Feldern. *Schweiz. Z. Psychol.* XVII, 110—126 (1958).
 11. — O. HÖFER, S. D. LAWDER u. U. M. LAWDER: Die Reproduzierbarkeit von elektrisch angeregten Lichterscheinungen (Phosphenen) bei 2 Versuchspersonen innerhalb von 6 Monaten. *Elektromedizin* 7, Nr. 4, 235 (1962).
 12. —, and J. KUGLER: Subjective light pattern spectroscopy in the electroencephalographic frequency range. *Nature (Lond.)* 148, 1823 (1959).
 13. — — Neuronal coincidence filters as a model for the perception of phosphenes. Vortrag bei der I.C.M.C.I.-Konferenz Tokio, 7. September 1964.
 14. — — O. HÖFER, and S. D. LAWDER: Effects of chemical stimulation of electrically-induced phosphenes on their bandwidth, shape, number and intensity. *Confin. neurol., (Basel)* 23, 201—206 (1963).
 15. LIBERMAN, E. A.: Possible ways of detecting electron conduction in nervous elements. *Biophysics* 3, 697—699 (1958).
 16. MAGNUSSON, C. E., and H. C. STEVENS: Visual sensations caused by changes in the strength of a magnetic field. *Amer. J. Physiol.* 29, 124—136 (1911).
 17. — — Visual sensations caused by a magnetic field. *Phil. Mag.* 28, 188—207 (1914).
 18. MARTIN, K.: Über elektromagnetische Therapie. *Z. physik. u. diät. Ther.* 12, 145 (1909).
 19. MÜLLER, E. K.: Über das Prinzip der „Perma-Elektrotherapie“. *Z. Elektrotherapie* 4, 357—366 (1902).
 20. OLENDORF, F.: Beiträge zur Elektrodynamik des Elektroschocks. III. Der induktive Schock. *Arch. Elektrotechn.* 48, 421—444 (1964).
 21. RENTSCH, W.: The application of stimulation with magneto-inductive energy transmission. Dig. of the 6th Int. Conf. on Med. Electronics and Biol. Engineering, Tokyo (1965).
 22. SEIDEL, D.: Der Existenzbereich elektrisch und magnetisch-induktiv angeregter subjektiver Lichterscheinungen (Phosphene) in Abhängigkeit von äußeren Reizparametern. Diss. aus dem Inst. f. Techn. Elektronik der TH München (1967).
 23. — Der Existenzbereich elektrisch und magnetisch-induktiv angeregter subjektiver Lichterscheinungen (Phosphene) in Abhängigkeit von äußeren Reizparametern. *Elektromedizin* (im Druck).
 24. SOLOVJEV, N. A.: Zum Mechanismus der biologischen Wirkung eines impulsförmigen Magnetfeldes. *Ber. d. Akad. der Wiss., UdSSR*, 149, 2, 438—441 (1963).
 25. THOMPSON, S. P.: The effects of magnetic fields. *Proc. Roy. Soc. B* 82, 996 (1910).

Dr. D. SEIDEL, Prof. Dr. M. KNOLL
und Priv.-Doz. Dr. J. EICHMEIER
Institut für Technische Elektronik
der Technischen Hochschule
8000 München 2, Arcisstraße 21