

## **Ermittlung des biomechanischen Schwingungsverhaltens menschlicher Bulbi mit Video-Technik**

H. Dupuis und E. Hartung

Arbeitsgruppe Anthropotechnik/Ergonomie des Institutes für Arbeits- und Sozialmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Obere Zahlbacher Straße 67, D-6500 Mainz, Bundesrepublik Deutschland

### **Research on the Biomechanical Vibration Behaviour of Man's Bulbi**

**Abstract.** Mechanical vibration may lead to a decrease in visual performance. This may be expected if the natural frequency of the eye is excited. Experiments with eight subjects and one repeat were carried out with the aim of calculating the biomechanical transmission of vibration between the cranium and the eye. The oscillation of the reflex-point of the cornea and of a light-point on the forehead were observed by a TV-camera and recorded using a multipoint-X-Y-tracker-system with a direct writer. The analysis showed typical resonance curves for the eye with maxima at 25–31.5 Hz typical to those found in animal experiments using other methods. Therefore at places of work transmission of such vibration frequencies to the head should be avoided to prevent a decrease in visual performance.

**Zusammenfassung.** Mechanische Schwingungen können die visuelle Wahrnehmung beeinträchtigen. Das ist vor allem dann zu erwarten, wenn der Glaskörper des Auges in Resonanzschwingungen gerät. Experimente mit 8 Versuchspersonen und je einer Wiederholung dienten der Ermittlung des frequenzabhängigen biomechanischen Übertragungsverhaltens von mechanischen Schwingungen zwischen Schädel und Bulbus. Die Bewegungen eines Reflexpunktes der angestrahlten Hornhaut und eines Lichtpunktes auf der Stirn wurden von einer Fernsehkamera erfaßt und über ein Multipoint-X-Y-Tracker-System mit Direktschreiber registriert. Die Auswertung hat – ähnlich wie bei Tierexperimenten mit anderer Methodik – typische Resonanzkurven der Bulbi mit Maxima bei 25–31,5 Hz ergeben. Um Beeinträchtigungen der Sehleistung zu vermindern, sollte an Arbeitsplätzen die Übertragung solcher Schwingungsfrequenzen auf den Kopf vermieden werden.

## Problemstellung und Aufgabe

Wenn der Mensch Vibrationen im höheren Frequenzbereich ausgesetzt ist, kann es nach Shoenberger (1972) zu Deformation und Eigenschwingungen des Augapfels und/oder des umgebenden Gewebes oder zu Störungen der Blutversorgung der Retina kommen. So werden auch Beeinträchtigungen der Sehleistung unter der Einwirkung von mechanischen Schwingungen mit höheren Frequenzen  $> 5$  Hz auf ein Verwackeln des Bildes auf der Retina zurückgeführt. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach dem biomechanischen Schwingungsverhalten des Bulbus, insbesondere nach dessen Resonanzfrequenz. Ist dieses bekannt, so können an schwingungsbelastenden Arbeitsplätzen technische Möglichkeiten gesucht und verwirklicht werden, um die Übertragung von solchen Schwingungsfrequenzen auf den Schädel und damit auf die Augäpfel zu vermeiden, die sich besonders nachteilig auf die Sehleistung auswirken.

Da die Bestimmung des biomechanischen Schwingungsverhaltens aus methodischen Gründen zum Teil erhebliche Schwierigkeiten bereitet, wurden zunächst Tierexperimente mit auf der Hornhaut aufgenähten Miniatur-Beschleunigungsaufnehmern an Primaten *in vivo* durchgeführt, über die kürzlich berichtet werden konnte, Dupuis und Hartung (1979). Eine Übertragung der hieraus gewonnenen Erkenntnisse auf die physiologischen Verhältnisse des Menschen war allerdings nicht ohne Einschränkungen möglich.

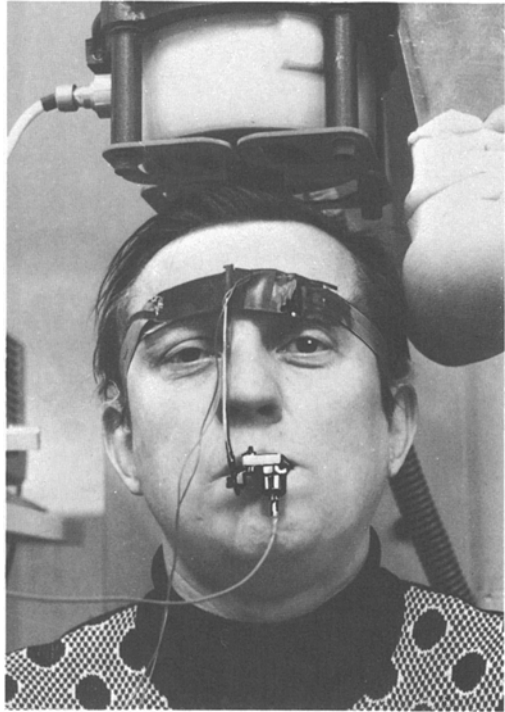
Nachdem jetzt eine Methode zur Verfügung stand, die die Hornhautreflexion eines Lichtstrahles ausnutzt und über ein Fernsehsystem eine elektronische Erfassung des Schwingweges ermöglichte, sollte diese in Experimenten mit Versuchspersonen eingesetzt werden, um das biomechanische Schwingungsverhalten menschlicher Bulbi näher kennenzulernen.

## Methodik

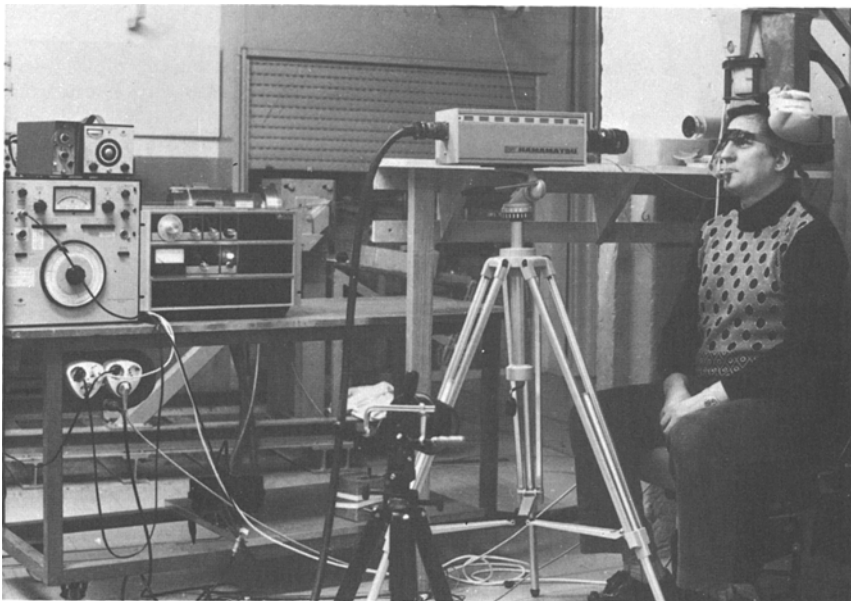
Von den von Doden (1976) genannten grundsätzlichen methodischen Möglichkeiten (Lichtreflexion von Hornhaut, Kontaktschalen oder Planspiegeln und Elektronystagnographie ENG) wurde das Prinzip der Hornhautreflexion eines Lichtstrahles gewählt. Denn uns schien in Humanexperimenten mit Schwingungsbelastung eine Anbringung von Planspiegeln und feststizenden Kontaktschalen auf dem Auge nicht möglich. Weiterhin hatten bei Vorversuchen mit Elektrookulographie unter Schwingungseinfluß Elektrodenverschiebungen zu Meßfehlern geführt.

Für das gewählte Verfahren wurde im verdunkelten Versuchsraum mit einer Lichtquelle ein Reflexionspunkt auf der Hornhaut der Versuchsperson erzeugt. Als Vergleichslichtpunkt diente eine unmittelbar über dem Auge auf der Stirn angebrachte Miniaturlampe, die durch Stirnband und Beißgestell fixiert war (Abb. 1).

Als meßtechnisches Verfahren, das in Zusammenarbeit mit Dr. med. L. Vogt, Institut für Flugmedizin der DFVLR, Bonn-Bad Godesberg, vorbereitet wurde, konnte ein Multipoint-X-Y-Tracker-Fernsehsystem, Typ HTV-681 der Firma Hamamatsu TV Co LTD eingesetzt werden. Eine auf Stativ befestigte Kamera nahm den Bildausschnitt (Auge und Stirnlampe) mit Teleobjektiv auf (Abb. 2). Der Bildverstärker mit einem Scope machte den Bildausschnitt sichtbar, fixierte die beiden Lichtpunkte (Cornea-Reflex und Stirnlampe) und verfolgte deren Bewegungen zweidimensional in vertikaler Frontalebene (X-Y-Tracker). Die den Schwingungen entsprechenden Bewegungen beider Lichtpunkte wurden in elektrische Spannungen umgewandelt und auf einem Kathodenstrahl-Oszilloskop und einem Direktschreiber zeitabhängig registriert (Abb. 3). Die Abtastrate des Tracker-Verfahrens betrug 7875 Hz, die Meßgenauigkeit  $\pm 2\%$  des gesamten Meßbereiches. Vom Direktschreiber ließen sich Auswertungen der Amplituden der Lichtpunktbewegungen von Hand vornehmen.



**Abb. 1.** Lichtpunkte auf der Hornhaut und auf der Stirn und Beschleunigungsaufnehmer am Bißgestell



**Abb. 2.** Fernsehkamera zur Erfassung der Lichtpunktbewegungen an Auge und Stirn

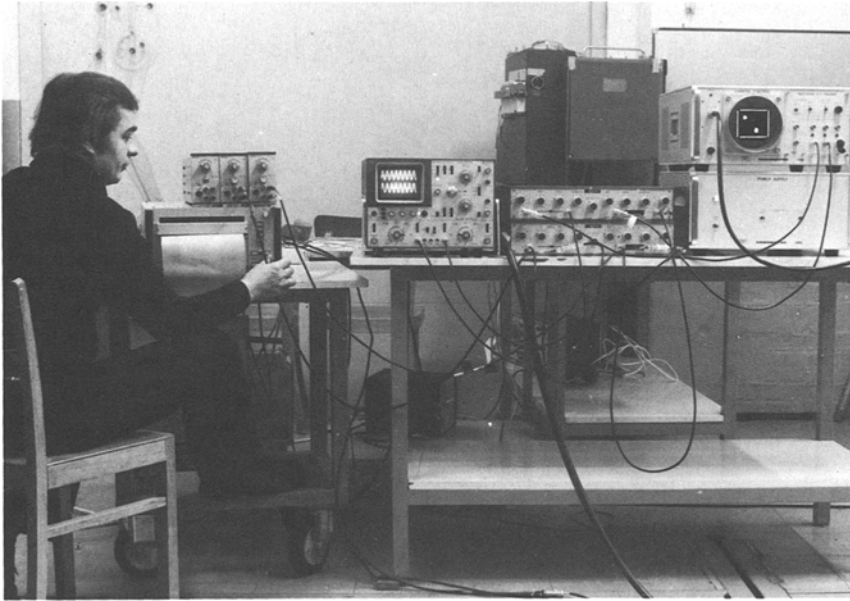


Abb. 3. X-Y-Tracker, Kathodenstrahl-Oszilloskop und Direktschreiber zur Lichtpunktregistrierung

Als Versuchspersonen VPn dienten 8 Institutsangehörige, die jede Versuchsreihe doppelt absolvierten. Die direkte Schwingungserregung des Kopfes der Versuchspersonen erfolgt mit einem elektromagnetischen Schwingungssimulator der Firma Ling (Abb. 1) mit einem Sinus-Kraftvektor von 178 N in Verbindung mit einem elektronischen Steuersystem. Die geringe Schwingkraft war gewählt worden, um ein Verletzungsrisiko für den Schädel auszuschließen. Das Gesamtgewicht des Schwingungserregers betrug nur 235 N, so daß derselbe auf einem Gestell in Kopfnähe angebracht werden konnte.

Es wurden vertikale Sinusschwingungen zwischen 8 und 80 Hz in 11 Frequenzstufen in den Kopf eingeleitet. Von den Versuchspersonen mußte eine Beschleunigungsintensität gewählt und für alle Versuche gleich gehalten werden, die als gerade noch zumutbar empfunden wurde. Die Beschleunigungen wurden jeweils mittels eines Aufnehmers an der Beißplatte (Abb. 1) zur Kontrolle gemessen. Sie betragen zwischen 3 und  $6 \text{ m/s}^2$  (Effektivwert). Die Versuchspersonen hatten während der Messungen mit den Augen einen in 4 m Entfernung angeordneten Festpunkt zu fixieren.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche mit Hilfe des Fernseh-Tracker-Systemes sind in Abb. 4 dargestellt. Als Übertragungsfaktor  $F$  ist der Quotient aus Schwingweg des Auges und Schwingweg der Stirn über der Frequenz aufgetragen. Es handelt sich um eine Kurve der arithmetischen Mittelwerte von jeweils 16 Einzelversuchen (8 Versuchspersonen mit je einer Wiederholung) mit den dazugehörigen Standardabweichungen. Deutlich ist eine Schwingungsvergrößerung der Bulbi zwischen 12,5 und 31,5 Hz mit einem Maximum der Resonanz bei 20 bis 25 Hz sichtbar. Die größte Überhöhung beträgt  $F=1,23$ . Bei Frequenzen  $> 31,5 \text{ Hz}$  tritt ein deutlicher Dämpfungseffekt ein, d.h. daß die Augäpfel weniger stark schwingen als die Stirn.

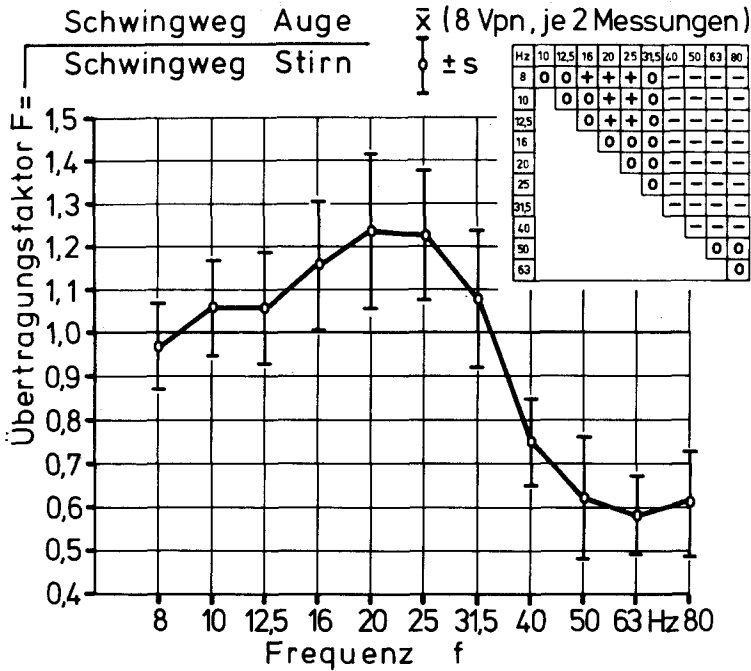


Abb. 4. Biomechanisches Schwingungsverhalten des Bulbus beim Menschen

Aus der Signifikanz-Matrix in Abb. 4 oben rechts kann abgelesen werden, daß die beiden höchsten Punkte dieser Kurve bei 20 und 25 Hz signifikant höher liegen als die Kurve bei 8 bis 12,5 und 40 bis 80 Hz. Damit kann das Resonanzverhalten der Bulbi mit Maximum der „Aufschaukelung“ bei 20 bis 25 Hz als statistisch gesichert gelten.

## Diskussion

Ergebnisse von Tierexperimenten an Primaten hatten ebenfalls typische Resonanzkurven ergeben, jedoch mit etwas höher liegenden Frequenzmaxima (25 bis 31,5 Hz) der Bulbi in vivo, Dupuis und Hartung (1979). Obgleich nach Angaben von Rohen<sup>1</sup> die mechanischen Eigenschaften des Glaskörpers von Schweinen und Primaten denen des menschlichen Auges durchaus vergleichbar sein dürften, ist eine Übertragung der Ergebnisse aus den Tierexperimenten auf die physiologischen Verhältnisse des Menschen nur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Massen der Bulbi möglich. So wurde bereits früher festgestellt, Dupuis und Hartung (1979), daß in einem einfachen Masse-Feder-System mit einer Eigenfrequenz

$$\text{Eigenfrequenz } \omega = \sqrt{c/m}$$

<sup>1</sup> Rohen, persönliche Mitteilung

und mit einer für Mensch und Primaten als ähnlich unterstellten Federkonstanten  $c$ , die von den Elastizitätseigenschaften des die Bulbi umgebenden Gewebes bestimmt wird, vor allem die Masse  $m$  die Eigenfrequenz des Augapfels in dem Sinne beeinflußt, daß geringere Masse höhere Eigenfrequenz bedeutet. Dementsprechend könnten die jetzt mit dem Lichtpunktverfahren festgestellten Ergebnisse so interpretiert werden, daß die größeren Massen der menschlichen Bulbi auch etwas niedrigere Eigenfrequenzen gegenüber denjenigen der Primaten mit sich bringen müssen.

Neuere Untersuchungen von Ohlbaum (1976) im Rahmen einer Dissertation auf dem Gebiete der physiologischen Optik kamen zur Feststellung eines Resonanzbereiches vorwiegend zwischen 12,5 und 25 Hz mit Maximum bei 18 Hz, wobei der Übertragungsfaktor 1,33 betrug. Schon früher hatten Coermann (1938) und Lange und Coermann (1962) Sehleistungsminderungen im Frequenzbereich zwischen 25 und 40 Hz bzw. bei 18 Hz auf Resonanzerscheinungen zurückgeführt.

Aufgrund der hier vorgestellten eigenen Experimente und der Untersuchungen von Ohlbaum (1976) muß mit Resonanz der menschlichen Bulbi in einem niedrigen Frequenzbereich um 18 bis 25 Hz gerechnet werden. Da es nach Abbildung 4 beim menschlichen Auge im gesamten Frequenzbereich zwischen 16 und 31,5 Hz zu größer werdenden Übertragungsfaktoren kommt, müßten auch in diesem Frequenzbereich Minderungen der optischen Wahrnehmung zu finden sein. Das ließ sich inzwischen durch weitere Untersuchungen bestätigen, bei denen die schwingungsabhängige Beeinflussung der Sehschärfe und der optischen Auffassungszeit ermittelt wurde, über die an anderer Stelle berichtet werden wird, Dupuis und Hartung (1980).

*Danksagung.* Die Autoren sind Frau W. Gilsdorf und den Herren K. Adler und K. Matzanke für die Mitarbeit dankbar. Der Sanitätsinspektion des Bundesministeriums der Verteidigung sei für Bereitstellung der Forschungsmittel gedankt.

## Literatur

- Coermann, R.R.: Untersuchungen über die Einwirkung von Schwingungen auf den menschlichen Organismus, *Jahrb. d. dtsh. Luftfahrtforschung* III, 112–142 (1938)
- Doden, W.: Nystagmus, Nystagmographie, In: Straub. Die ophthalmologischen Untersuchungsverfahren, Bd. 2, S. 200, Stuttgart: Enke 1976
- Dupuis, H., Hartung, E.: Tierexperimente zur Ermittlung des biomechanischen Schwingungsverhaltens des Bulbus, *Graefes Arch. klin. exp. Ophthal.* **210**, 167–174 (1979)
- Dupuis, H., Hartung, E.: Einfluß von Vibrationen auf die optische Wahrnehmung, *Forschungsbericht*, zur Veröffentlichung vorbereitet (1980)
- Lange, K.O., Coermann, R.R.: Visual acuity under vibration, *Human Factors* 291–300 (1962)
- Ohlbaum, M.K.: Mechanical resonant frequency of the human eye in vivo, *Aerospace Medical Research Laboratory-TR-75-113 Diss.* Ohio 1976
- Shoenberger, R.W.: Human response to whole-body vibration, *Perceptual and Motor Skills*, **34**, 127–160 (1972)

Eingegangen am 27. Dezember 1979