

Die Entwicklung der visuellen Stabilisation des aufrechten Standes beim Kind: Ein Reifezeichen in der Kinderneurologie

Thomas Brandt¹, Dieter Wenzel² und Johannes Dichgans²

¹Neurologische Klinik mit klinischer Neurophysiologie, Krupp-Krankenanstalten,
Wittekindstraße 30—86, D-4300 Essen 1, Bundesrepublik Deutschland

²Neurologische Universitätsklinik mit Abteilung für Neurophysiologie, Hansastraße 9,
D-7800 Freiburg i. Br., Bundesrepublik Deutschland

Visual Stabilization of Free Stance in Infants: A Sign of Maturity

Summary. The development of the visual contribution to postural stabilization has been tested using a large visual display rotating around the stationary subject's line of sight. This, in the adult, causes a marked optokinetic postural reaction with a shift of the body center of gravity toward the direction of pattern motion. Scalings of the reactions in children between 6 months and 16 years revealed three phases of development: (1) 6—12-month-old-babies show none or very little optokinetic disturbance of their newly acquired ability to sit. With the development of upright stance and gait, optokinetic influences become increasingly important. (2) Children between the age of 2—5 show a marked dependence of postural stability on vision. In them, the disturbing optokinetic stimulus leads to a marked ipsilateral postural deviation or irresistible fall. (3) From 5 to 15 years of age, visual effects on postural balance slowly decrease to their final strength in adulthood—moderate head and body tilt—in response to the rotating stimulus.

It is concluded that the optokinetic loop participates rather late in the multisensory process of postural stabilization. The calibration of the three main loops, visual, vestibular, and proprioceptive, seems to be sequential and mutually interactive. Optimal functioning requires the continuous evaluation of the reafferent sensory consequences of self-generated body movements.

Optokinetic destabilization of stance requires the maturity of opto-vestibulo-spinal pathways. Its clinical applicability as a maturity test, however, so far seems limited.

Key words: Development – Optokinetic Postural Stabilization – Visuo-graviceptive Interaction – Maturity Sign.

Zusammenfassung. Die Rotation einer künstlichen visuellen Umwelt um die Sehlinie bedingt optokinetische Haltungsreaktionen. So wurde die Entwicklung der visuellen Stabilisation des aufrechten Standes und Sitzes vom

Säuglings- bis zum Erwachsenenalter untersucht. Die optokinetischen Haltungsreaktionen in Form einer Kopf- oder Körperneigung und Falltendenz bis zum Umfallen wurden vom Versuchsleiter nach einem einfachen Skalierungsverfahren beurteilt.

Im Mittel zeigte sich ein dreiphasischer Verlauf der Reaktionen mit zunehmendem Alter. 1. Säuglinge von 6—12 Monaten werden trotz unsicherer Balance beim gerade erlernten Sitz durch optokinetische Störreize kaum irritiert, jedoch tritt mit Erlernen des aufrechten Standes und Ganges eine steil zunehmende Abhängigkeit der Körperbalance von visuellen Informationen ein. 2. Kinder zwischen dem 2. und 5. Lebensjahr sind in ihrer Haltungsregulation in hohem Maße von gesehenen Umweltkontrasten abhängig und zeigen eine deutliche Fallneigung während der Reizmusterbewegung. 3. Ab dem 5. Lebensjahr nimmt die visuelle Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes wieder langsam ab und nähert sich mit dem 15. Lebensjahr bereits dem Ausmaß der Reaktion Erwachsener mit leichter Kopf- und Rumpfneigung in Richtung der Reizmusterbewegung. Die optokinetische Haltungsstabilisierung im Gravitationsfeld gewinnt somit erst mit deutlicher Verzögerung — nach der Funktionsreife des vestibulären und propriozeptiven Systems — an Bedeutung. Das multisensorische Standstabilisierungssystem wird offenbar sequentiell unter gegenseitigem Abgleich der einzelnen Regelkreise durch ständige Selbsterregung bei aktiven Körperbewegungen eingeeicht.

Die visuelle Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes ist ein Reifezeichen der statomotorischen Entwicklung. Die Bedeutung als klinischer Reifetest kann noch nicht abschließend beurteilt werden.

Schlüsselwörter: Entwicklung – Optokinetische Haltungsstabilisation – Optisch-graviceptive Interaktion – Reifezeichen.

A. Einleitung

1. Visuelle Haltungsstabilisation

Neben vestibulären und anderen propriozeptiven Afferenzen aus Gelenken, Muskeln und Haut regeln visuelle Rückmeldungen über spontane Körperschwankungen die Stabilisation des aufrechten Standes. Dies ist allein aus der Zunahme der Körperschwankungen bei Augenschluß ersichtlich. Die visuelle Stabilisation bei offenen Augen beruht auf den durch die Körperunruhe induzierten Relativbewegungen des Abbildes der visuellen Umwelt auf der Retina. Die afferenten visuellen Meldungen werden möglicherweise über das Praetectum (Collewyn, 1975; Hoffmann und Schoppmann, 1975), die untere Olive (Maekawa und Simpson, 1973; Mizuno et al., 1974) und den Flocculus (Simpson und Alley, 1974) auf die Vestibulariskerne geschaltet und dort mit vestibulären Afferenzen integriert (Dichgans et al., 1973; Henn et al., 1974), um dann die Standmotorik über den Tractus vestibulo-spinalis zu beeinflussen.

In der klinischen Neurologie wird seit Romberg die Standsicherheit nach Wegfall der visuellen Stabilisation durch Augenschluß untersucht. Vergleiche mit dem Stand bei offenen Augen zeigen für Patienten bei spinaler Ataxie durch Tabes dorsalis (Duchenne, 1858; Frenkel, 1907; André Thomas, 1940) oder Heredoataxie (Morbus Friedreich) eine stärkere visuelle Stabilisation als bei Patienten mit cerebellären Systemerkrankungen (Dichgans et al., 1976) und akuten peripheren Labyrinthläsionen (Barré, 1949; De Haan, 1959; De Wit, 1973). Der gesunde Erwachsene zeigt geringere Unterschiedswerte der Körperunruhe für die Bedingungen „Augen-auf“ und „Augen-zu“: die feine Standunruhe nimmt bei geschlossenen Augen um 50—100% zu (Travis, 1945; Edwards, 1946).

2. Optokinetische Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes

Die Bedeutung der visuellen Information für den aufrechten Stand und Sitz zeigt sich nicht nur durch Verminderung der Schwankamplituden bei „Augen-auf“ gegenüber „Augen-zu“, sondern kann auch indirekt dadurch gemessen werden, daß es gelingt, die Haltung bei unverändertem vestibulo-propriozeptivem Eingang durch Rotation einer künstlichen visuellen Umwelt zu destabilisieren. Die Beobachtung großflächiger Bewegungsreize löst eine unwillkürliche Fallneigung in Richtung der Musterbewegung aus (Fischer und Kornmüller, 1930; Edwards, 1946; De Wit, 1972; Dichgans et al., 1972, 1974; Lishman und Lee, 1973). Grundlage dieser eindrucksvollen Reaktion ist die optisch-bewegungsinduzierte Verschiebung der visuellen und posturalen Vertikalen (Dichgans et al., 1972; Held et al., 1975). Sie ist das Ergebnis eines je nach Kopfstellung gewichteten Kompromisses aus den hier widersprüchlichen retinalen (bewegten) und gravizeptiven (statischen) Afferenzen (Dichgans et al., 1974, 1975). Das vestibulo-spinale System „kompensiert“ diese scheinbare Körperkipfung wie ein reales Schwanken mit Hilfe von Haltungsreaktionen, so daß einer wahrgenommenen Schiefe in Gegenrichtung der Musterbewegung entsprechend eine tatsächliche Fallneigung in Richtung der Reizmusterbewegung eintritt. Die Fallneigung ist damit ein meßbarer Ausdruck optokinetischer Haltungsregulationen.

In dieser Arbeit sollte geprüft werden, ob visuelle Destabilisationsreize schon beim Kleinkind zur Bewertung des Entwicklungsstandes der visuell vestibulären Interaktionen bei der Standregulation herangezogen werden können. Einziger Hinweis ist bisher der Bericht von Lee und Aronson (1974) über 4 Kinder im Alter von ein- bis anderthalb Jahren, die durch lineare Bewegungen eines umgebenden Raumes zum Schwanken und teilweise auch zum Fallen gebracht werden konnten. Wir machten bei experimentellen Voruntersuchungen zur optokinetischen Haltungsregulation zufällig die uns zunächst überraschende Beobachtung, daß Säuglinge beim freien Sitz und Kleinkinder in den ersten Wochen nach Erlernen des Stehens ganz im Gegensatz zu Erwachsenen keine wesentliche visuelle Beeinflussung der Körperbalance durch experimentelle Umweltrotationen zeigten. Es schien uns danach interessant, die Entwicklung der optokinetischen Destabilisierbarkeit der Haltung im Säuglings- und Kindesalter zu verfolgen und zu prüfen, ob „optokinetische Haltungsreflexe“ als ein Reifezeichen der visuo-motorischen Koordination beim Kleinkind zu verwerten sind.

B. Methodik

1. Untersuchte Kinder und Erwachsene

Es wurden insgesamt 109 neurologisch gesunde Kinder im Alter von 6 Monaten bis 10 Jahren¹, 52 Schüler im Alter von 10—18 Jahren und 16 Erwachsene im Alter von 20—40 Jahren untersucht. Es wurde in insgesamt 8 Altersgruppen mit gleicher Anzahl männlicher und weiblicher Versuchspersonen unterteilt (Tabelle 1), wobei die Gruppe S die sitzenden Säuglinge und Gruppe 7 die Erwachsenenkontrollgruppe darstellen.

2. Reizapparatur und Versuchsdurchführung

Die visuelle Reizung erfolgte mit einer einfachen, transportablen, halbsphärischen Handdreh-trommel, die innen ein Reizmuster randomisiert verteilter unterschiedlich großer, farbiger Kontraste trug (Abb. 1). Sie wurde manuell vor dem Kopf des Kindes etwa um dessen Sehachse mit einer durchschnittlichen Winkelgeschwindigkeit von 30—50°/sec rotiert. Der Abstand zwischen Trommel und Kind wurde möglichst klein gehalten, damit das gesamte Gesichtsfeld und vor allem die Gesichtsfeldperipherie vom Reizmuster erfüllt war, was für die Auslösung subjektiver Eigenbewegungen bedeutsam ist (Brandt et al., 1973; Held et al., 1975; Dichgans und

Tabelle 1. Die Altersgruppen der untersuchten Kinder und ihre optokinetisch induzierten Haltungs- veränderungen. \bar{x} ist der Mittelwert aus den Schätzwerten für die optisch induzierte Haltungs- korrektur aller Kinder, wobei +, ++, +++ durch Ziffern 1, 2 und 3 ersetzt wurden; s gibt die Standardabweichung an.

Gruppe	Alter in Jahren	Stand				Sitz			
		An- zahl	männl. weibl.	\bar{x}	s	An- zahl	männl. weibl.	\bar{x}	s
S	0,6— 1	—	—	—	—	7	$\frac{m}{w} \frac{4}{3}$	0,25 0,66	0,50 0,57
1	1 —< 2	12	$\frac{m}{w} \frac{6}{6}$	1,33 1,50	0,52 0,55	18	$\frac{m}{w} \frac{9}{9}$	0,89 1,33	0,50 0,50
2	2 —< 3	10	$\frac{m}{w} \frac{5}{5}$	2,60 2,40	0,55 0,55	10	$\frac{m}{w} \frac{5}{5}$	1,6 2,0	0,54 0,70
3	3 —< 5	42	$\frac{m}{w} \frac{21}{21}$	2,62 2,43	0,50 0,51	38	$\frac{m}{w} \frac{19}{19}$	1,57 1,57	0,60 0,60
4	5 —< 10	32	$\frac{m}{w} \frac{16}{16}$	2,31 1,88	0,48 0,55	32	$\frac{m}{w} \frac{16}{16}$	1,50 1,18	0,73 0,40
5	10 —< 15	24	$\frac{m}{w} \frac{12}{12}$	1,42 1,58	1,00 1,00	24	$\frac{m}{w} \frac{12}{12}$	0,75 0,83	0,86 0,93
6	15 —< 18	28	$\frac{m}{w} \frac{14}{14}$	0,86 1,29	0,95 1,20	28	$\frac{m}{w} \frac{14}{14}$	0,5 0,78	0,65 0,80
7	20 — 40	16	$\frac{m}{w} \frac{8}{8}$	0,87 1,37	0,64 0,91	16	$\frac{m}{w} \frac{8}{8}$	0,50 0,81	0,53 0,83

¹ Wir danken Herrn Doz. Dr. Hellwig, St. Hedwigs-Kinderkrankenhaus, Freiburg, für die freundliche Unterstützung dieser Arbeit.

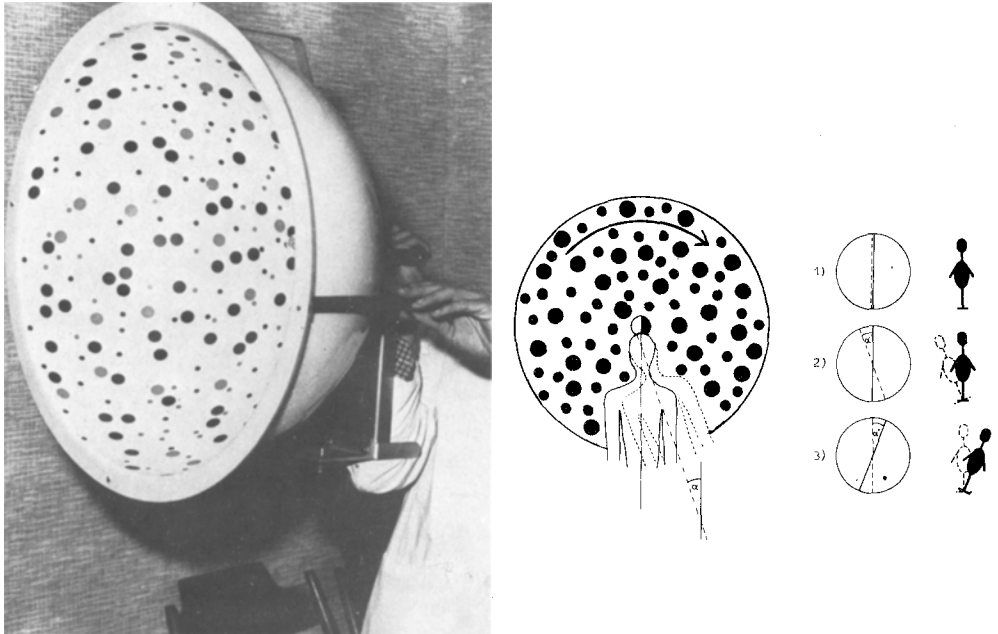


Abb. 1. Links: einfache halbsphärische Handdrehtrommel mit randomisiert verteiltem Reizmuster zur Darbietung einer visuellen Umweltrotation um die Schachse. Rechts: schematische Darstellung der durch eine Umweltrotation nach rechts bei einer objektiv stationären Versuchsperson induzierten scheinbaren Körperkippung in Gegenrichtung (2). Die scheinbare Körperkippung wird wie eine reale Körperbewegung durch die Haltungsreaktionen beantwortet, so daß eine tatsächliche Fallneigung in Richtung der Reizmusterbewegung resultiert (3)

Visuelle Destabilisation

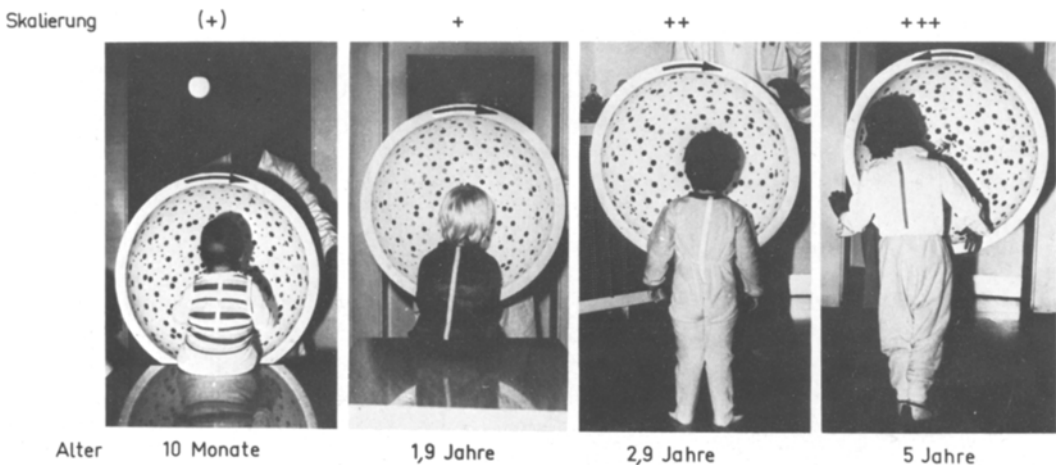


Abb. 2. Beispiele von Kindern unterschiedlichen Alters mit verschieden starker Ausprägung optokinetischer Haltungsreaktionen von + bis +++

Aufrechter Stand des Kindes

■ männlich
● weiblich

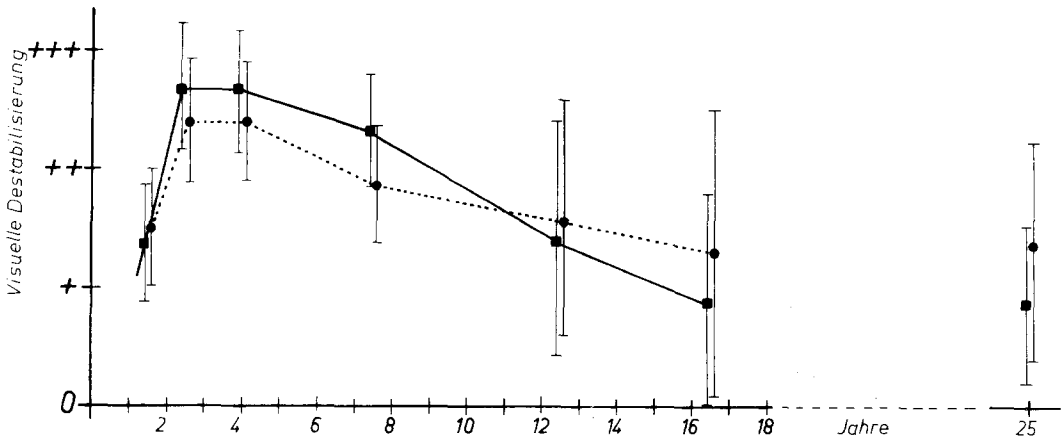


Abb. 3. Mittelwerte und Standardabweichungen der visuellen Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes durch Umweltrotation in einer fronto-parallelen Ebene für männliche (—) und weibliche (....) Versuchspersonen in Abhängigkeit vom Alter (7 Gruppen)

Brandt, 1976). Im Mittelpunkt des Reizgerätes war zur Unterstützung der Fixation und Anregung der visuellen Aufmerksamkeit ein auswechselbares Tierbildchen befestigt. Die Reizdauer betrug 20—30 sec für eine Drehrichtung bei ruhigem Stand und Sitz des Kindes.

Eine Messung der reaktiven Schwerpunkt Bewegungen über Grund und der dabei entstehenden dynamischen Kräfte, wie wir sie bei Erwachsenen durchführen (Dichgans et al., 1976; Mauritz et al., 1975), ist bei Säuglingen und Kleinkindern nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich. Die Beurteilung der optokinetisch induzierten Haltungsreaktion erfolgte daher nach einer einfachen Viererskalierung:

- 0 = keine sichtbare Haltungsreaktion;
- + = leichte Kopf- oder Rumpfeigung in Richtung der Musterbewegung;
- ++ = deutliche Kopf- oder Rumpfeigung mit seitlicher Gewichtsverlagerung;
- +++ = schwere Destabilisierung mit Abstütz- und Abspreizreaktion der Extremitäten oder Hinfallen (Abb. 2).

C. Ergebnisse

Bei fast allen Kindern konnte der freie Stand durch Rotation einer künstlichen visuellen Umwelt um die Sehlinie beeinflusst werden. Die Reaktionen reichten von leichter Kopf-Schief-Haltung bis zum Hinfallen und zeigten im Mittel eine deutliche Altersabhängigkeit. In Abb. 3 und Tabelle 1 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der optokinetisch ausgelösten Haltungsunruhe mit Falltendenz in Richtung der Musterbewegung für die männlichen (—) und weiblichen Kinder (....) in Abhängigkeit von den verschiedenen Altersgruppen dargestellt. Jungen und Mädchen zeigen einen gleichartigen Verlauf der visuellen

Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes mit zunehmendem Alter. Diese kann in drei Phasen unterteilt werden:

1. Geringe Fallneigung der Kinder im ersten Lebensjahr mit steil ansteigender Irritierbarkeit des aufrechten Standes durch Umweltrotation bis zum Ende des zweiten Lebensjahres;

2. starke, optokinetisch auslösbare Fallneigung bei Kindern vom zweiten bis fünften Lebensjahr;

3. allmähliche Abnahme der visuellen Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes bei den Kindern vom 6. bis 15. Lebensjahr. Zu jenem Zeitpunkt sind die Effekte ähnlich gering, wie bei der Erwachsenen-Kontrollgruppe mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren.

Die Betrachtung der Einzelergebnisse zeigt eine relativ große interindividuelle Streuung. Ab dem ersten Lebensjahr wurden Reaktionen von + bis +++ beobachtet. Mehrfachtestung erwies, daß die intraindividuelle Varianz mit ± 1 ebenfalls relativ groß ist.

Die Untersuchungen am sitzenden Kind ergaben einen ähnlichen dreiphasischen Verlauf, wobei jedoch im ganzen die visuelle Irritierbarkeit der Haltung wegen des stabileren Gleichgewichts im Sitzen etwas geringer ist. Dieser Test erlaubt eine Beurteilung der Reaktionen von Säuglingen schon vom 5. Monat an. Obwohl der freie Sitz hier gerade erst erlernt und noch unsicher ist, findet sich in diesem Alter meist keine sichtbare Beeinflussbarkeit der spontanen Körperunruhe durch künstliche Umweltrotation (Abb. 4).

Aufrechter Sitz des Kindes

■ männlich
● weiblich

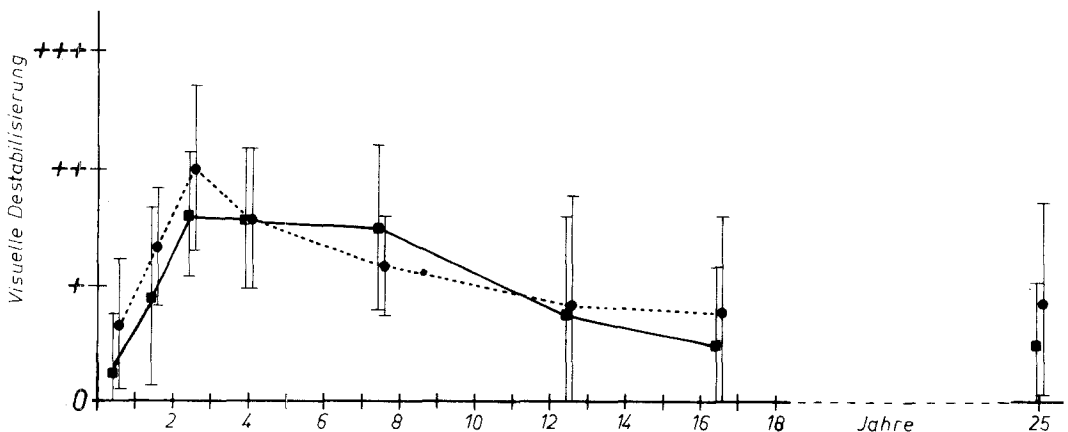


Abb. 4. Mittelwerte und Standardabweichungen der visuellen Destabilisierbarkeit des freien Sitzes durch Umweltrotation in einer fronto-parallelen Ebene für männliche (—) und weibliche (· · · ·) Versuchspersonen in Abhängigkeit vom Alter (8 Gruppen)

D. Diskussion

Beim aufrechten Stand verhält sich der Körper ähnlich einem umgekehrten Pendel (Nashner, 1970), wobei feine Schwankungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude den multisensorischen Eingangsreiz zur mehrfachgeregelten Haltungskorrektur darstellen. Voraussetzung der visuellen Stabilisation des aufrechten Standes ist eine durch selbst generierte Körperschwankungen hervorgerufene retinale Bewegungsmessung. Eine seitliche Körperschwankung wird als Relativbewegung zu ruhenden Kontrasten visuell erfaßt und löst eine „reflektorische Haltungskorrektur“ zur Gegenseite aus. In der vorliegenden Arbeit wurde der visuelle Beitrag zur Haltungsstabilisation nicht, wie üblich, durch Bestimmung der Differenz der Körperschwankungen für die Bedingungen „Augen-auf“ und „Augen-zu“, sondern als destabilisierender Faktor des freien Standes und Sitzes unter experimenteller Umweltrotation um die Schachse gemessen.

Die Ergebnisse sprechen für die eingangs dargestellte Hypothese. Der visuelle Beitrag zur Haltungsregulation des Kindes im Schwerfeld zeigt eine altersabhängige Entwicklung. Bei Säuglingen zwischen dem 6. und 12. Lebensmonat können keine deutlichen optokinetischen Haltungsreaktionen beobachtet werden. Kinder zwischen dem 2. und 5. Lebensjahr werden jedoch beim freien Stand und Sitz durch großflächige Umweltbewegungsreize leicht aus dem Gleichgewicht gebracht. Sie zeigen eine deutliche Fallneigung in Richtung der Reizmusterbewegung. Nach dem 5. Lebensjahr nimmt die visuelle Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes parallel mit der allgemein zunehmenden Sicherheit in der Haltungsregulation — und wahrscheinlich in deren Folge — wieder ab und erreicht etwa mit dem 15. Lebensjahr bereits die Erwachsenenwerte. Erwachsene zeigen bei geschlossenem beidfüßigem Stand gewöhnlich eine deutlich sichtbare Kopf- und leichte Rumpfneigung in Richtung der Reizmusterbewegung, jedoch ohne schwere Fallreaktion. Beim Einbeinstand können auch Erwachsene das Gleichgewicht während einer Umweltrotation in einer fronto-parallelen Ebene nicht halten.

Es ist nach diesen Ergebnissen wahrscheinlich, daß die optokinetische Haltungsreaktion nach der vorläufigen Optimierung des propriozeptiven und vestibulären Regelkreises erst in einer zweiten Phase — während der Entwicklung des aktiven aufrechten Standes und Ganges — an Bedeutung gewinnt. Die optisch-gravizeptiv-propriozeptive Mehrfachregelung zur *Stabilisierung der Körperhaltung scheint sequentiell* aktiviert und dann im wechselseitigen Abgleich der einzelnen sensomotorischen Kontrollelemente *eingeeicht* zu werden. Erst die „Entwicklung“ der aktiven Motorik erlaubt es, selbst erzeugte „Testreize“ (Körperschwankungen) mit ihren sensorischen Konsequenzen für Lagesinn, Vestibularorgan und das Sehen zu vergleichen. In diesem Sinne ist unser Konzept einer an die aktive Motorik gebundenen Organisation sensomotorischen Verhaltens den von Held und Hein (1963) nach Katzenversuchen mit selektiver Deprivation entwickelten Vorstellungen über die Organisation des visuell orientierten Laufverhaltens nahe verwandt. Eine stufenweise Kalibrierung — wie nach unseren Experimenten wahrscheinlich — scheint funktionell sinnvoll².

Fußnote s. S. 9

Es ist bekannt, daß das vestibuläre System zum Zeitpunkt der Geburt bereits funktionsfähig ist (Galebsky, 1927; Farmer, 1966; Peiper, 1968; Tibbling, 1969; Vojta, 1969; Eviata et al., 1974), was in Form der vestibulo-oculären Reaktionen (Drehnystagmus, kalorischer Nystagmus, Puppenkopffänomen) sowie verschiedener Lagereflexe (Vojta-Reflex, Landau-Reaktion) getestet werden kann. Nach Studien an Neugeborenen unterschiedlicher Geburtsgewichte und Gestationsalter wurde die Untersuchung vestibulo-oculärer Reaktionen als Reifetest gesunder Neugeborener vorgeschlagen (Eviata et al., 1974). Auch das Fixieren bewegter Blickziele durch konjugierte Augenfolgebewegungen und optokinetischer Nystagmus wurde bei Neugeborenen beobachtet und elektrooculographisch registriert (Gorman et al., 1957; Dayton und Jones, 1964).

Dagegen setzt die etwas unglücklich benannte „optische Stehbereitschaft“, die, verwandt zu unseren Untersuchungen, eine visuell induzierte Haltungsregulation darstellt, bekanntermaßen erst nach dem 6. Lebensmonat ein (Rademaker, 1931; Peiper, 1963).

Der vestibulo-oculäre Reflex, der vor allem der Aufrechterhaltung der Fixation von ruhenden Sehzielen während passiver und aktiver Kopfbewegungen dient, ist bisher besser untersucht als die optisch-gravizeptive Haltungsregulation und soll hier kurz zum Modellverständnis der Optimierungsmechanismen eines multisensorischen Regelsystems während der kindlichen Entwicklung diskutiert werden. Der vestibulo-oculäre Reflex ist beim neugeborenen menschlichen Säugling zwar vorhanden, jedoch entspricht die Geschwindigkeit der durch Drehbeschleunigungen hervorgerufenen Augendeviation und der langsamen Phasen des erst ab dem 2. bis 3. Lebensmonat regelmäßig auslösbaren Nystagmus noch nicht den Verhältnissen beim Erwachsenen (Tibbling, 1969). Der „Verstärkungsfaktor“ ist also noch nicht festgelegt. Bei im Dunkeln aufgezogenen Katzen konnten Berthoz et al. (1975) nachweisen, daß der angeborene vestibulo-oculäre Reflex, gemessen an Amplitude und Geschwindigkeit der resultierenden Augenbewegungen, erst nach Exposition in einer beleuchteten Umwelt genau eingeeicht wird. Entsprechend zeigen Blinde eine vestibulo-oculäre Untererregbarkeit gegenüber Gesunden (Forsmann, 1964). Ähnliches scheint für die visuelle Stabilisation des Stehens zu gelten. Edwards (1942, 1946) hat gezeigt, daß Blinde niemals so standsicher werden, wie Sehende bei geschlossenen Augen sind. Sie haben ihr visuelles System nicht zur Optimierung der intakten propriozeptiven Kontrollmechanismen einsetzen können und zeigen bleibend doppelte Schwingungsamplituden ihrer spontanen Körperunruhe.

Das Beispiel des angeborenen vestibulo-oculären Reflexes veranschaulicht, daß Sehinformationen der Kontrolle des Verstärkungsfaktors dienen. Die visuelle

² Die Ergebnisse passen zu dem empirischen Befund, daß Säuglinge und Kleinkinder unter zwei Jahren beim Transport in Fahrzeugen gegenüber Bewegungskrankheiten praktisch immun sind, während Kinder zwischen dem 2. und 12. Lebensjahr eine besonders hohe Anfälligkeit aufweisen (Money, 1970). Bewegungskrankheiten in Fahrzeugen treten vor allem bei optisch-vestibulären Reizkonflikten auf, wenn die vestibulären Körperbeschleunigungen und die visuelle Information scheinbarer Körperruhe (durch Beobachtung stationärer Fahrzeugkontraste im Gesichtsfeld) in Widerspruch stehen (Brandt et al., 1971; Dichgans und Brandt, 1973; Brandt, 1974). Die geringe Anfälligkeit der Kinder unter 2 Jahren kann durch die funktionelle Unreife der visuell-vestibulären Interaktionsmechanismen in diesem Alter und den damit nur geringen „optisch-vestibulären Reizkonflikt“ erklärt werden.

Eichkontrolle bleibt auch im Erwachsenenalter aktiv und garantiert damit Kompensationsfähigkeit bei Läsionen und Plastizität bei neuen Reizbedingungen. Bei der zentralen Kompensation des Spontannystagmus nach akuten peripheren Labyrinthläsionen können ähnliche Mechanismen beteiligt sein. Versuche über den vestibulo-oculären Reflex bei dauerndem Tragen einer Umkehrprismenbrille illustrieren die Plastizität. Durch längeres Tragen einer Umkehrbrille konnte beim

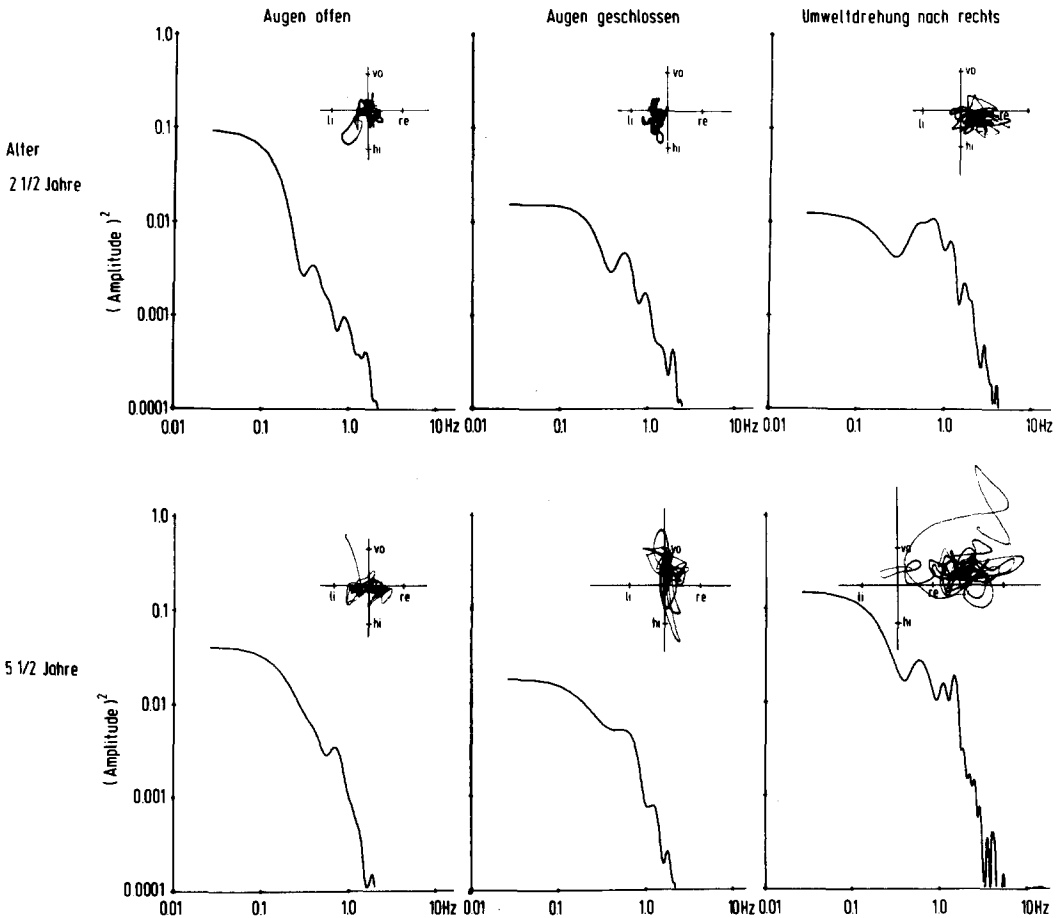


Abb. 5. Zwei Originalregistrierungen der Körperschwankungen eines 2 und eines 5 Jahre alten Kindes für die Versuchsbedingungen „Augen-auf“, „Augen-zu“ und Umweltdrehung um die Sehachse nach rechts. Die Daten wurden mit einer elektronischen Piezokristall-Stabilometerplattform (Kistler) gewonnen, die das Drehmoment registriert. Neben der Originalregistrierung der Körperschwankungen im Koordinatensystem sind außerdem Fourier-Power-Spektren als Maß für die Beziehungen zwischen Amplitude und Frequenz der Körperschwankungen dargestellt. Bei dem 2 Jahre alten Kind findet sich kein großer Unterschied zwischen den Bedingungen „Augen-auf“, „Augen-zu“. Die Umweltdrehung führt nur zu einer geringen, ebenenspezifischen Zunahme der seitlichen Körperbewegungen nach rechts, die auch im Fourier-Spektrum erkennbar ist. Das 5 Jahre alte Kind zeigt bei geschlossenen Augen deutlichere Schwankungen gegenüber „Augen-zu“; während der Umweltdrehung entsteht eine schwere Instabilität mit Verlagerung des Körperschwerpunktes nach rechts

Menschen und beim Tier die Richtung des vestibulo-oculären Reflexes entsprechend den neuen optokinetischen Reizbedingungen während der Kopfbewegungen umgekehrt werden (Gonshor und Melvill Jones, 1973; Davis und Melvill Jones, 1976; Melvill Jones und Davis, 1976).

Die optische Stabilisation und Destabilisierbarkeit des aufrechten Standes stellt ein Reifezeichen der visuo-motorischen Koordination im Kleinkindalter dar und zeigt Parallelen zu der Entwicklung der optischen Stehbereitschaft. Die hier verwandte Viererskalierung der optokinetischen Haltungsreaktionen ist jedoch wegen der großen inter- und intraindividuellen Streuungen sowie der unvermeidlichen Willkür bei der Skalierung von Grenzfällen als klinischer Reifetest bislang nur bedingt brauchbar. Es sind zunächst weitere Untersuchungen mit Kindern verzögerter sensomotorischer Entwicklung unter Gegenüberstellung mit anderen bekannten Reifezeichen notwendig. Zur besseren Quantifizierbarkeit wurden jetzt Verlaufsstudien mit Messungen der Körperschwingungsamplituden und -frequenzen begonnen. Wir erhoffen uns weiteren Aufschluß über die kindliche Entwicklung der visuomotorischen Interaktion durch genaue Differenzierung der feinen Körperschwankungen mit Hilfe einer elektronischen Stabilometerplattform und durch Fourier-Analysen (Bensel und Dzendolet, 1968; Nashner, 1970; Dichgans et al., 1976) unter den Bedingungen „Augen-zu“ — „Augen-auf“ und während optokinetischen Störreizen (Abb. 5).

Nur so ist eine differenzierte Beschreibung des Arbeitsbereiches und Frequenzganges der einzelnen Regelmechanismen möglich, die nach Nashner wahrscheinlich nur teilweise überlappen.

Literatur

- André-Thomas: Equilibre et Equilibration. Paris: Masson 1940
Barré, J. A.: Epreuve de Romberg vestibulaire. *Nouv. Tr. Méd.* **15**, 105 (1949)
Bensel, C. K., Dzendolet, E.: Power spectral density analysis of the standing sway of males. *Percept. and Psychophys.* **4**, 285—288 (1968)
Berthoz, A., Jeannerod, M., Vital-Durand, F., Oliveras, J. L.: Development of vestibulo-ocular responses in visually deprived kittens. *Exp. Brain Res.* **23**, 425—442 (1975)
Brandt, Th.: Die optokinetisch-vestibuläre Bewegungskrankheit: Pathogenese, physikalische und medikamentöse Prävention. Habilitationsschrift, Freiburg 1974
Brandt, Th., Dichgans, J., Koenig, E.: Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Exp. Brain Res.* **16**, 476—491 (1973)
Brandt, Th., Wist, E. R., Dichgans, J.: Optisch induzierte Pseudo-Coriolis-Effekte und Circularvektion. Ein Beitrag zur optisch-vestibulären Interaktion. *Arch. Psychiat. Nervenkr.* **214**, 365—389 (1971)
Collewyn, H.: Direction selective cells in the rabbit's nucleus of the optic tract. *Brain Res.* **100**, 489—508 (1975)
Davies, P., Melvill Jones, G.: An adaptive neural model compatible with plastic changes induced in the human vestibulo-ocular reflex by prolonged optical reversal of vision. *Brain Res.* **103**, 546—550 (1976)
Dayton, G. O., jr., Jones, M. H.: Analysis of characteristics of fixation reflex in infants by use of direct current electro-oculography. *Neurology (Minn.)* **14**, 1152—1156 (1964)
De Haan, P.: The significance of optic stimuli in maintaining the equilibrium. *Acta Otolaryng. (Stockh.)* **50**, 109—115 (1959)
De Wit, G.: Optic versus vestibular and proprioceptive impulses measured by posturometry. *Aggressologie* **13 B**, 75—79 (1972)

- Dichgans, J., Brandt, Th.: Visual-vestibular interaction. Effects on self-motion perception and postural control. In: *Handbook of Sensory Physiology* (Eds. R. Held, H. Leibowitz and H.-L. Teuber), Vol. VIII. Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1976
- Dichgans, J., Brandt, Th., Held, R.: The role of vision in gravitational orientation. In: *Mechanisms of Spatial Perception and Orientation as related to Gravity* (ed. H. Schöne). *Fortschr. Zool.* **23**, 255—263 (1975)
- Dichgans, J., Diener, H.-C., Brandt, Th.: Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. *Acta-Otolaryng.* (Stockh.) **78**, 391—398 (1974)
- Dichgans, J., Held, R., Young, L., Brandt, Th.: Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. *Science* **178**, 1217—1219 (1972)
- Dichgans, J., Mauritz, K.-H., Allum, J. H. J., Brandt, Th.: Postural sway in normals and atactic patients: Analysis of the stabilizing and destabilizing effects of vision. *Agresologie* (1976, in press)
- Dichgans, J., Schmidt, C. L., Graf, W.: Visual input improves the speedometer function of the vestibular nuclei in the goldfish. *Exp. Brain Res.* **18**, 319—322 (1973)
- Duchenne, G. B. A.: De l'ataxie locomotrice progressive. *Recherches sur une maladie caractérisée spécialement par des troubles généraux de la coordination des mouvements.* *Arch. gén. Méd.* 641—652 (1858)
- Edwards, A. S.: The measurements of static ataxia. *Am. J. Psychol.* **55**, 171—188 (1942)
- Edwards, A. S.: Body sway and vision. *J. Exp. Psych.* **36**, 526—535 (1946)
- Eviatar, L., Eviatar, A., Naray, I.: Maturation of neurovestibular responses in infants. *Develop. Med. Child Neurol.* **16**, 435—446 (1974)
- Farmer, T. W.: *Pediatric Neurology*. New York: Hoeber 1966
- Fischer, M. A., Kornmüller, A. E.: Der Schwindel. In: *Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie* XV, 1 (Hrsg. A. Bethe, G. v. Bergmann, G. Emden, A. Ellinger), pp. 442—494. Berlin: Springer 1930
- Forsman, B.: Vestibular reactivity in case of congenital nystagmus and blindness. *Acta Otolaryng.* (Stockh.) **57**, 539—555 (1964)
- Frenkel, H. S.: *L'ataxie tabétique*. Paris: Alcan 1907
- Galebsky, A.: Vestibular Nystagmus in new-born infants. *Acta Otolaryng.* (Stockh.) **11**, 409—423 (1927)
- Gonshor, A., Melvill Jones, G.: Changes of human vestibulo-ocular response induced by vision-reversal during head rotation. *J. Physiol. (Lond.)* **234**, 102—103 (1973)
- Gorman, J. J., Cogan, D. G., Gellis, S. S.: An apparatus for grading the visual acuity of infants on the basis of optokinetic nystagmus. *Pediatrics* **19**, 1088—1092 (1957)
- Held, R., Dichgans, J., Bauer, R.: Characteristics of moving visual scenes influencing spatial orientation. *Vision Res.* **15**, 357—365 (1975)
- Held, R., Hein, A.: Movement produced stimulation in the development of visually-guided behaviour. *J. comp. physiol. Psychol.* **56**, 872—876 (1963)
- Henn, V., Young, L. R., Finley, C.: Vestibular nucleus units in alert monkeys are also influenced by moving visual fields. *Brain Res.* **71**, 144—149 (1974)
- Hoffmann, K.-P., Behrend, K., Schopmann, A.: A direct afferent visual pathway from the nucleus of the optic tract to the inferior olive in the cat. *Brain Res.* (1976, in press)
- Hoffmann, K.-P., Schopmann, A.: Retinal input to direction selective cells in the nucleus tractus opticus of the cat. *Brain Res.* **99**, 359—366 (1975)
- Lee, D. N., Aronson, E.: Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Percept. and Psychophys.* **15**, 529—532 (1974)
- Lee, D. N., Lishman, J. R.: Visual proprioceptive control of stance. *J. Hum. Movem. Stud.* **1**, 87—95 (1975)
- Lishman, J. R., Lee, D. N.: The autonomy of visual kinaesthesia. *Perception* **2**, 287—294 (1973)
- Maekawa, K., Simpson, J. I.: Climbing fiber response evoked in the vestibulo-cerebellum of rabbit from visual system. *J. Neurophysiol.* **36**, 649—666 (1973)
- Mauritz, K.-H., Dichgans, J., Allum, J. H. J., Brandt, Th.: Frequency characteristics of postural sway in response to self-induced and conflicting visual stimulation. *Pflüg. Arch. ges. Physiol. Suppl.* **355**, 189 (1975)

- Melvill Jones, G., Davies, P.: Adaptation of cat vestibulo-ocular reflex to 200 days of optically reversed vision. *Brain Res.* **103**, 551—554 (1976)
- Mizuno, N., Nakamura, Y., Iwahori, N.: An electron microscope study of the dorsal cap of the inferior olive in the rabbit, with special reference to the pretecto-olivary fibers. *Brain Res.* **77**, 385—395 (1974)
- Money, K. E.: Motion Sickness. *Physiol. Rev.* **50**, 1—39 (1970)
- Nashner, L. M.: Sensory feedback in human posture control. Sc. D. Thesis, MTV 70—3, Cambridge, Mass., Man Vehicle Lab. MIT 1974
- Peiper, A.: Die Eigenart der kindlichen Hirntätigkeit. Leipzig: Edition 1963
- Rademaker, G. G. J.: Das Stehen. Berlin: 1931
- Simpson, J. I., Alley, K. E.: Visual climbing fiber input to rabbit vestibulo-cerebellum: A source of direction-specific information. *Brain Res.* **82**, 302—308 (1974)
- Tibbling, L.: The rotatory nystagmus response in children. *Acta Otolaryng. (Stockh.)* **68**, 459—467 (1969)
- Travis, R. C.: An experimental analysis of dynamic and static equilibrium. *J. Exp. Psych.* **35**, 216—234 (1945)
- Vojta, V.: Ein neuer Lagereflex in der Frühdiagnostik des Cerebralschadens bei Neugeborenen und Säuglingen. *Z. Orthop.* **107**, 1—11 (1969)

Eingegangen am 23. Juni 1976