

Eine neuartige Bewegungstäuschung: Duncker Illusion und «Motion Capture» im Widerstreit

Max R. Dürsteler, Zürich

Im Interdisziplinären Zentrum für Schwindel- und Gleichgewichtstörungen des Universitätsspitals Zürich führten wir Pilotversuche mit verschiedenen optokinetischen Stimulationsgeräten durch. Beim Gebrauch eines so genannten «head mounted device» (HMD, eine Art Lupenbrille mit vor den Lupen montierten Flüssigkristall-Minibildschirmen), stiessen wir auf eindruckliche Bewegungstäuschungen mit scheinbarem Bewegungsstillstand des optokinetischen Reizes.

Die auf dem HMD sichtbare Bildsequenz simulierte eine Rotation des Umfeldes um eine Körperachse. Wenn man den Kopf oder auch den ganzen Körper in der entgegengesetzten Richtung zur wahrgenommenen Bildrotation drehte, schien das Bild still zu stehen. Dies liess sich mit horizontalen, vertikalen und torsionalen Bildrotationen beobachten. Die Geschwindigkeit der Kopfdrotation musste nur ungefähr der Bildgeschwindigkeit entsprechen, um den Eindruck eines perfekt stabilisierten Bildes zu erzielen. Wenn die Aufmerksamkeit (nicht die Blickrichtung) auf den Rand des Bildschirms gerichtet war, wurde die Szene als sich in einem stabilen Fenster bewegend, aber im Verhältnis zur Retina als stabilisiert wahrgenommen. Im folgenden soll diese Bewegungstäuschung näher analysiert und bekannten Bewegungstillusionen verglichen werden.

Bei den hier zu berichtenden eigenen Resultaten handelt es sich weitgehend um Einzelbeobachtungen. Die Phänomene der Bewegungsinduktion wurden in der Blütezeit der Gestaltpsychologie durch K. Duncker¹ in seiner 1929 erschienenen Doktorarbeit systematisch untersucht. Das Phänomen des scheinbaren Bewegungsstillstandes einer bewegten Szene auf einem bewegten Monitor wurde in einer psychophysischen Versuchsserie von Meslam und Wertheim 1996 untersucht².

Zusammenfassung

Bewegt man einen Bildschirm mit einem bewegten Muster vor einem Beobachter hin und her, nimmt dieser abhängig von den Bewegungsrichtungen des Monitors und der Bewegung des Musters eine eigenartige Bewegungstillusion wahr: die wahrgenommene Geschwindigkeit des bewegten Musters kann sich bis zum scheinbaren Stillstand verlangsamen. Hier werden einige Experimente beschrieben, die diese

wahrgenommene Bewegungsverlangsamung als das Resultat einer visuo-visuellen asymmetrischen Interaktion zwischen Vorder- und Hintergrund erklären. Die Beziehungen zu bekannten Wahrnehmungsphänomenen wie der Duncker-Illusion und der «motion capture» werden diskutiert. Neurophysiologische Studien lassen vermuten, dass diese Bewegungstillusionen mit funktionellen Eigenschaften des parietalen Kortex zusammenhängen.

Résumé

Quand une texture animée, telle qu'un stimulus opto-cinétique, est présentée sur un écran oscillant devant un observateur, celui-ci perçoit une illusion de mouvement qui dépend des directions relatives de la vitesse de l'écran et de la vitesse de sa texture: la vitesse perçue de la texture peut ralentir jusqu'à son annulation. Ici on décrit des expériences montrant que

la perception d'une vitesse décélérée résulte d'une interaction asymétrique entre l'avant-plan et l'arrière-plan. Les relations avec des phénomènes de perception connus (illusion de mouvement induit de Duncker, phénomène de «motion capture») seront abordées. Des études neurophysiologiques suggèrent que ces illusions soient liées à des propriétés fonctionnelles du cortex pariétal.

Abstract

If a display showing a moving texture like an optokinetic stimulus is swayed in front of an observer, he perceives a motion illusion depending on the relative motion of the display and the moving texture: the perceived velocity of the texture may decelerate to a complete standstill. This paper describes some experiments to show

that the perception of a deceleration is due to an asymmetric interaction between foreground and background. The relations to known motion illusions like the «induced motion» of Duncker and «motion capture» are discussed. Neurophysiological studies lead to the assumption that these illusions are related to functional properties of the parietal cortex.

Methoden

Geräte

Die Stimuli wurden auf verschiedenen PC-Monitoren dargestellt. Bei unseren ersten Versuchen verwendeten wir ein HMD mit einem Gesichtsfeld von 48° horizontal und 36° vertikal. Der Output der PC-Graphikkarte (640 Pixel horizontal, 480 Pixel vertikal) wurde durch ein elektronisches Interface in ein Videosignal umgewandelt. Die nominelle Auflösung der LCD-Minibildschirme betrug 320 Pixel horizontal und 240 Pixel vertikal. Für die Pilotversuche verwendeten wir einen Sony Vaio PCG-GRX316MP Laptop mit einem 16"-TFT-Bildschirm (Auf-

lösung 1600 Pixel horizontal, 1200 Pixel vertikal; Bildschirmwechselrate 60 Hz). Der Laptop war mit einem ATI Mobility Radeon 7500 Graphikprozessor ausgestattet. Dieser Laptop diente auch zur Ansteuerung des HMD. Für die Versuche mit Infeld und Umfeld verwendeten wir einen Samsung SyncMaster 191T 19"-Flachbildschirm (Auflösung 1280 Pixel horizontal, 1024 Pixel vertikal). Als Rechner diente eine Compaq Evo 4000 Workstation mit ATI Radeon 7500 Graphikadapter. Der Abstand zum Beobachter betrug 0.57 m, entsprechend einer aktiven Bildschirmgrösse von 30° horizontal und 27.7° vertikal.

Software

Unsere Stimmulationsprogramme gehören zur Klasse der Panorama-Viewer-Programme. Die Umwelt lässt sich dabei mittels Maus oder Tasten um den Beobachter drehen. Bei unserer Software können Parameter wie Lage der Drehachse, Drehgeschwindigkeit, Weite des Blickwinkel etc. nach Wunsch eingestellt werden. Die Programme sind Eigenentwicklungen auf der Basis des Microsoft Direct X Software Developer Kit Version 9.0 und Algorithmen aus der drei-dimensionalen Spieleprogrammierung. Für die Darstellung der Umwelt verwenden wir eine so genannte Skybox, einen virtuellen Würfel, dessen sechs Innenflächen mit Fotos der Umwelt in den 6 Kardinalrichtungen ausgeschlagen sind (Abb. 1). Die Fotos zeigen je einen 90° x 90° grossen Ausschnitt der Umwelt. Das auf dem Bildschirm sichtbare Bild entspricht dem Abbild einer virtuellen Kamera in der Mitte der Skybox. Drehungen der Kamera gegenüber dem Würfel erscheinen auf dem Bildschirm als Drehungen der Skybox-Umwelt um den Beobachter herum. Als Ziel oder Fixationspunkt lassen sich diverse 3D-Objekte einsetzen. Die Bildwechselgeschwindigkeit hängt im wesentlichen von der Güte der Graphikkarte ab. Bei unseren Rechnern erreichten wir eine Bildwechselgeschwindigkeit von 60 Bildern/sec bei voller Bildschirm-auflösung.

Für das Studium der Wechselwirkungen zwischen Vordergrundszenen (nachfolgend als «Infeld» bezeichnet) und Hintergrundszenen (nachfolgend als «Umfeld»

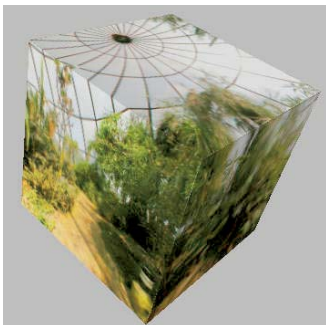


Abb. 1 Beispiel einer «Skybox», von aussen gesehen.

Bei Computerspielen und Panorama-Programmen wird die Umwelt häufig auf einen Würfel projiziert (so genannte Skybox). Der virtuelle Beobachter sitzt in der Mitte des Würfels. Die Bilder auf den Würfelflächen wurden hier von aussen sichtbar gemacht.

bezeichnet) wird ein zweites Programm verwendet, wodurch eine bis drei ineinander liegende verschiedene Skyboxes gleichzeitig unabhängig voneinander gedreht werden können.

Eine Bildschirmmaske («stencil buffer») bestimmte, welche der Skyboxes auf einer Bildschirmregion sichtbar war: Ein kreisförmiger Ausschnitt in der Bildschirmmitte (typischer Durchmesser 21 cm) gab den Blick auf die eine Skybox, das Infeld, frei; der Rest des Bildschirms eröffnete den Blick auf die zweite Skybox («Umfeld»). Bei der Verwendung von mehreren Skyboxes reduzierte sich die Bildwechselrate bei unseren Rechnern auf 30 Bilder/sec bei voller Auflösung. Dieses Programm bietet die Möglichkeit, einzelne Bildsequenzen als Serie von Einzelbildern auszugeben. Mit Hilfe der Videosoftware «Pinnacle Studio 9» (Pinnacle Systems, 280 N. Bernardo Avenue Mountain View, CA 94043, USA) erstellte ich daraus Videosequenzen für Demonstrationen.

Zur Herstellung/Umrechnung der 90° x 90° Photos aus Weitwinkelfotografien verwendete ich frei die erhältliche Software «Panorama Tools» von Prof. Helmut Dersch, Fachhochschule Furtwangen/Deutschland, zusammen mit dem Programm «PTGUI» (New House Internet Services BV, Niederlande) und dem Bildbearbeitungsprogramm «Photoshop 7» (Adobe Systems Incorporated, 345 Park Avenue, San Jose, CA 95110-2704, USA). Die Berechnung der alternativ verwendeten Zufallspunktemuster («random dots») basierte auf der Annahme einer Kugel, deren Oberfläche aus 50% weissen und 50% schwarzen Texeln (kleinste Einheit eines Oberflächenmusters) in zufälliger Verteilung zusammengesetzt war.

Resultate

Beobachtungen bei bewegtem Vollbild

Um die mit dem HMD beobachteten Bewegungstäuschungen weiter zu analysieren, liess ich die Bildsequenzen auf dem Bildschirm eines Laptop ablaufen und bewegte den Laptop mit ausgestreckten Armen hin und her.

Rotation um die vertikale Achse

Bei einer Rotation des Laptops mit ausgestreckten Armen um die vertikale Körperachse, wobei sich die Szene auf dem Laptop nach rechts drehte (Abb. 2), er-

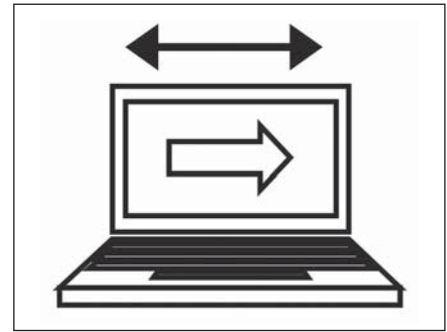


Abb. 2 Typische Situation für das Auftreten einer illusionären horizontalen Bewegungsverlangsamung auf einem Computerbildschirm.

Die auf dem Bildschirm dargestellte Szene bewegt sich gleichförmig nach rechts. Wird der Bildschirm in der Horizontalen hin und her bewegt, erscheint die Eigenbewegung der Szene stark verlangsamt, wenn der Bildschirm entgegen der Szenen-Bewegungsrichtung nach links bewegt wird.

In unserem Fall erhielten wir vergleichbare Resultate für fotorealistische Bildsequenzen, bei denen sich die dargestellte Szene um die vertikale Körperachse des Beobachters drehte. Gegenüber einer reinen Translation bewegten sich bei einer Rotation die Punkte zur Peripherie hin langsamer gemäss den trigonometrischen Gesetzen.

schien die Szene stillzustehen, wenn der Bildschirm entgegen der Szenen-Bewegungsrichtung nach links bewegt wurde.

Rotation um die torsionale Achse

Bei schnellen Hin- und Herbewegungen des Laptops um die torsionale Achse (Sehachse) nahm ich einen scheinbaren Stillstand der Szenendrehbewegung wahr (Abb. 3), die bei Stillhalten wieder in Gang kam. Bei langsameren Drehbe-



Abb. 3 Typische Situation für das Auftreten eines illusionären Einfrierens der Drehbewegung auf einem Computerbildschirm.

Dreht man den Laptop hin und her, scheint die Drehung der Szene auf dem Laptop intermittierend einzufrieren. Erst, wenn man den Laptop stillhält, beginnt sich die Szene wieder kontinuierlich zu drehen.

wegungen schien sich die Szenenbewegung besonders dann zu verlangsamen, wenn ich den Laptop in die entgegengesetzte Richtung drehte. Um unsere Beobachtungen unter besser kontrollierten Bedingungen zu verifizieren, änderte ich die Versuchsanordnung.

Beobachtungen bei bewegtem In- und Umfeld

Statt den Bildschirm mit der bewegten Szene hin und her zu drehen, imitierte ich die Versuchssituation des vor einem Hintergrund hin und her bewegten Bildschirms in einer Bildschirmanimation. Die Bewegungen der virtuellen Bildschirmerszene und des virtuellen Bildschirms über seinem Hintergrund konnten so genau kontrolliert werden. Mögliche vestibuläre Einflüsse durch Kopfmithbewegungen entfielen. Eine kreisförmige Region in der Bildschirmmitte wie in Abbildung 3 entsprach der bewegten Szene auf dem Laptopbildschirm. Ich bezeichne sie nach der von Karl Duncker¹ verwendeten Terminologie als «Infeld». Der Rest des Bildschirms sollte die Hintergrundszene hinter dem Laptop darstellen. Ich bezeichne sie nach K. Duncker als «Umfeld». Die virtuelle Grenze zwischen In- und Umfeld entsprach dem Bildschirmrahmen. Bewegungen des Laptops gegenüber dem Hintergrund werden durch gegenläufige Bewegungen des Umfeldes simuliert.

Rotation um die torsionale Achse

Einfluss des Umfeldes auf das Infeld
Wenn sich das Umfeld um ein *stationäres Infeld* drehte, schien sich das Infeld in der Gegenrichtung zum Umfeld zu drehen. Der Effekt war relativ schwach. Die Umfelddrehungen zeigten keinen Einfluss auf die wahrgenommene Lage der Infeld-Ränder. Bei sinusoidaler Rotation des Umfeldes um ein sich konstant *drehendes Infeld* (Abb. 4, Schema und aktuelle Bildszenen) nahm ich wahr, dass das Infeld periodisch langsamer drehte oder gar ganz zum Stillstand kam. Das Infeld schien sich immer dann langsamer zu drehen, wenn die Umfelddrehrichtung mit der Infelddrehrichtung übereinstimmte und die Infelddrehgeschwindigkeit nicht grösser als etwa die maximale Umfelddrehgeschwindigkeit war.

Einfluss des Umfeldes auf das Umfeld
Rotierte das Infeld bei *stationärem Umfeld* um die Blickrichtung des Beobachters, liessen sich keine Scheinbewegungen des Umfeldes erkennen. Auch wenn

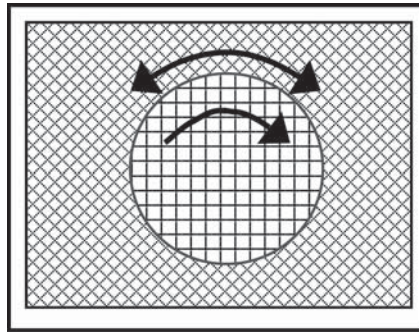


Abb. 4a Schema der Testanordnung für das scheinbare Einfrieren der Drehbewegung.

Auf dem Bildschirm dreht sich ein inneres kreisförmiges Objekt im Uhrzeigersinn nach rechts. Wir nennen dieses vom Hintergrund umschlossene Objekt nach Duncker das «Infeld». Das umschliessende Objekt, nach Karl Duncker «Umfeld», wird sinusförmig hin und her gedreht. Die physikalisch gleich bleibende Drehung des Infeldes erscheint verlangsamt, wenn sich das Umfeld in der gleichen Drehrichtung wie das Infeld dreht.



Abb. 4b Beispiel für die verwendeten fotorealistischen Bildreize.

Die Bildszenen wurden aus 360°x180° Panoramaaufnahmen der Gewächshäuser des botanischen Gartens in Zürich errechnet. Die Abbildung zeigt das erste Bild der für Versuche mit Drehbewegungen oder Expansionen/Kontraktionen von Um- und Infeld verwendeten Filmsequenzen.



Abb. 4c Beispielbild aus einer Filmsequenz mit Rotation des In- und Umfeldes.

die Flächen von In- und Umfeld gleich gross waren, konnte das Infeld keine Umfeldscheinbewegungen induzieren. Das Umfeld wurde dazu zu einem flächengleichen Kreissegment um das Infeld reduziert, der restliche Hintergrund flickerte.

Bei sinusoidaler Rotation des Infeldes und sich mit konstanter Geschwindigkeit *drehendem Umfeld* (Abb. 5) nahm ich keine periodischen Verlangsamung der Umfelddrehgeschwindigkeit wahr.

Rotation um die vertikale oder horizontale Achse

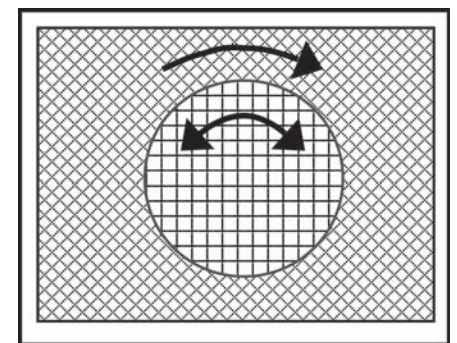


Abb. 5 Schema des Kontrollversuches zu Drehbewegungsillusionen.

Induzieren sinusoidale Drehbewegungen des Infeldes ebenfalls deutliche perzeptuelle Verlangsamungen des sich gleichförmig drehenden Umfeldes? Die Antwort lautet nein.

Die von uns verwendeten optokinetischen Stimulationsprogramme simulieren Drehungen um den Beobachter, als ob dieser in einer OKN-Kugel sitzen würde. In erster Annäherung lässt sich eine Drehung um die vertikale («yaw») Achse durch eine Translation in der Horizontalen simulieren, eine Drehung um die horizontale Achse («pitch») durch eine

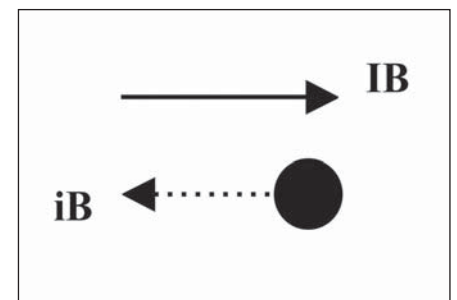


Abb. 6 Schematische Darstellung von Duncckers Grundversuch.

Der sich nach rechts bewegende Karton induziert eine scheinbare Gegenbewegung des auf den Karton projizierten Lichtflecks. IB: induzierende Bewegung, iB: induzierte Bewegung.

Reiztranslation in der Vertikalen. In diesem Sinne kann man unsere Beobachtungen mit den klassischen Versuchen von K. Duncker vergleichen. Er verwendete einen grossen, an Schnüren aufgehängten gemusterten Pappkarton (Abb. 6) als Umfeldreiz, den er in der Horizontalen hin und her bewegen konnte (Induzierende Bewegung). Dabei schien sich ein mit einem fixen Spiegel auf den Pappkarton projizierte Lichtfleck in der Gegenrichtung zu bewegen (induzierte Bewegung). Wenn sich bei unserer Versuchsanordnung das Umfeld um die vertikale oder horizontale Beobachterachse drehte, war eine deutliche *Scheinbewegung des Infeldes* in der Gegenrichtung zu beobachten. Der Effekt zeigte sich am deutlichsten an den Rändern des Infeldes, welche sich entgegengesetzt zur Umfeldbewegungsrichtung zu verschieben schienen. Die Scheinbewegung des Infeldes war weitgehend unabhängig davon, ob die Infeldtextur stationär war oder sich bewegte. Wurde das Umfeld sinusoidal bei konstanter Bewegung der Infeldtextur hin und her bewegt (entsprechend einer Drehung um eine Achse in der fronto-parallelen Beobachterebene), *verlangsamte* sich die wahrgenommene Geschwindigkeit des Infeldmusters, wenn sich das Umfeldmuster in gleicher Richtung wie das Infeldmuster bewegte. Dieser Effekt fand sich nur, wenn die Geschwindigkeit des Infeldmusters nicht grösser als die Geschwindigkeit des Umfeldmusters war. Die Beurteilung der Texturbewegung am Infeldrand war wegen den induzierten Scheinbewegungen der Infeldränder erschwert. Hin- und Herschieben der Infeldtextur (entsprechend einer Drehung um die Körperlängsachse des Beobachters) vermochte weder Scheinbewegungen der Umwelt zu induzieren noch gleichsinnige Umfeldtexturbewegungen zu verlangsamen.

Ungleiche Rotationsachsen von Infeld und Umfeld

Die Versuchsanordnung war ähnlich wie oben: sinusoidale Rotationen des Umfeldes um die horizontale Achse, konstante Rotation des Infeldes um eine variable Drehachse in der fronto-parallelen Ebene (Abb. 7).

Bei einem Versuch mit um 90° verschiedenen Drehachsen bewegte sich die Infeldtextur zwischen links und rechts hin und her (Rotation um die vertikale

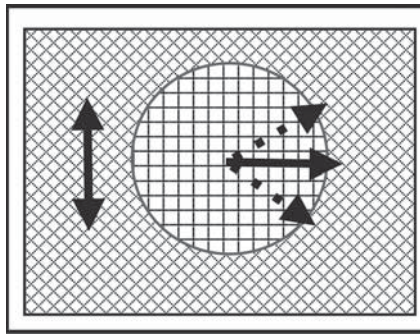


Abb. 7 Schema des Versuchs mit einer sinusoidalen Rotation der Umfeldtextur um eine horizontale Drehachse und der Infeldtextur um eine vertikale Drehachse.

Die physikalischen Bewegungsrichtungen der Texturen werden durch die ausgezogenen Pfeile symbolisiert. Die gepunkteten Pfeile geben die wahrgenommenen Bewegungsrichtungen nach rechts oben bzw. nach links unten wieder, wenn sich das Umfeld mit maximaler Geschwindigkeit nach unten bzw. nach oben dreht.

Drehachse), die Umfeldtextur bewegte sich zwischen unten und oben hin und her (Rotation um die horizontale Drehachse). Die wahrgenommene Richtung der Infeldbewegung änderte sich im Takt mit der Umfeldbewegung: bewegte sich das Umfeld nach oben, schien sich das Infeld nach rechts unten zu bewegen, bewegte sich das Umfeld nach unten, schien das Infeld nach links oben zu gleiten. Der wahrgenommene Geschwindigkeitsbetrag der Infeldtextur blieb konstant.

Bei einem Winkel $\alpha < 90^\circ$ zwischen den Drehachsen von In- und Umfeld schien sich die wahrgenommene Infeld-Texturgeschwindigkeit zu verlangsamen, wenn sich Umfeld und Infeld zur gleichen Richtung hin bewegten. Der Verlangsamungseffekt nahm mit abnehmendem α zu und war am deutlichsten bei paralleler, d.h. gleicher Drehachse. Entsprechende quantitative Experimente stehen noch aus.

Bewegungen in die Tiefe

In unseren Simulationsprogrammen lässt sich der Blickwinkel, worunter der Beobachter auf die Szene schaut, verändern. Dies entspricht dem Zoomen mit einer Zoomlinse (dabei verändert sich aber die Linsenbrennweite). Subjektiv entsteht der Eindruck, dass sich die Szene bei verlängerter Brennweite nähert und bei verkürzter Brennweite vom Beobachter entfernt. Wird bei stationärem Infeld das Umfeld herangezogen (Abb. 8), scheint sich das Infeld vom Beobachter weg zu bewegen.

Wird das Umfeld weggezogen (d.h. der Blickwinkel vergrössert sich), scheint sich das Infeld zum Beobachter hin zu bewegen.

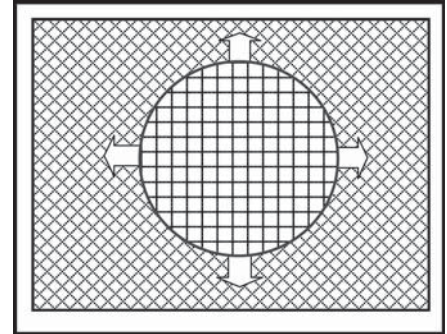


Abb. 8a Schema des Versuchs zur Induktion von Scheinbewegungen in der Tiefe: Expansion/Kontraktion des Umfeldes.

Die Expansion des Umfeldes induziert im stationären Infeld eine Scheinbewegung in die Tiefe: das Infeld scheint sich vom Beobachter wegzubewegen, bei der anschliessenden Kontraktion des Umfeldes scheint sich das Infeld zum Beobachter hin zu bewegen.



Abb. 8b Beispielbild aus einer Versuchsserie mit Expansion des Umfeldes bei stationärem Infeld.

Vergleiche mit Startbild in Abb. 3b. Die Expansion/Kontraktion der fotorealistischen Bilder wird durch den Einsatz einer virtuellen Zoomlinse erreicht.

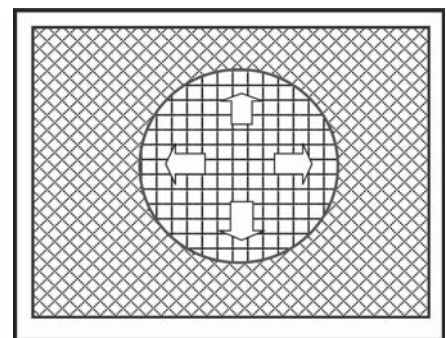


Abb. 9a Schema des Kontrollversuchs zu induzierten Tiefenbewegungen: Expansion/Kontraktion des Infeldes

Die Frage ist, ob sich durch eine Expansion/Kontraktion des Infeldes scheinbare Tiefenbewegungen des stationären Umfeldes induzieren lassen. Die Antwort lautet nein.



Abb. 9b Beispielbild aus einer Filmsequenz mit Expansion des Infeldes bei stationärem Umfeld.

Wird bei stationärem Umfeld das Infeld herangezoozt (Abb. 9), lassen sich keine Scheinbewegungen des Umfeldes erkennen, wie auch nicht, wenn das Infeld weggezoozt wird.

Zufallspunktemuster und fotorealistische Szenen

Die beschriebenen Phänome sind nicht abhängig von der Verwendung fotorealistischer Szenen, sondern lassen sich auch mit klassischen Zufallspunktemustern beobachten. Beiden Reizen ist gemeinsam, dass die im Bild sichtbaren Ortfrequenzen über einen weiten Bereich streuen.

Bei der Verwendung von Zufallspunktemustern tritt ein zusätzliches Phänomen auf: Sind Geschwindigkeit von Umfeld und Infeld annähernd gleich, lässt sich das Infeld nicht mehr vom Umfeld abgrenzen und vereinigt sich mit dem Umfeld. Erst, wenn der Geschwindigkeitsunterschied an den Rändern genügend gross wird, scheint der Infeldkreis aus dem Umfeld herauszuquellen.

Diskussion

Die beobachteten Effekte sind auf eine Kombination von mehreren Bewegungsillusionen zurückzuführen. Um in der Diskussion zwischen den Bewegungen der Konturen von In- und Umfeld (hier meist stationär) und den Bewegungen der auf ihnen dargestellten Szenen zu unterscheiden, werde ich im letzteren Fall von Texturbewegung des In- und Umfeldes sprechen.

Induzierte Bewegung

Die erste Illusion bezieht sich auf die durch die Bewegung des Umfeldes induzierte Gegenbewegung eines Infeldes (die *induzierte Bewegung*), wie sie von Karl

Duncker 1929 eingehend studiert wurde. Sie tritt bei Translationen oder Rotationen³ des Umfeldes relativ zum Infeld auf. Sie findet sich ebenso bei Bewegungen in die Tiefe unter der Verwendung stereoskopischer Reize⁴. Ich finde sie auch bei Kontraktionen oder Expansion der Umfeldtexturen. Die Illusion ist in dem Sinne asymmetrisch, dass die Bewegungen eines umschliessenden Umfeldes Bewegungen des Infeldes induzieren, aber Bewegungen des Infeldes keine Bewegungen des Umfeldes¹. Gemeinhin wird das Umfeld dem Hintergrund und das Infeld einem Vordergrund-Objekt gleichgesetzt.

Bei den Beobachtungen wurden die *Augenbewegungen* nicht registriert. Aus der Literatur ist bekannt, dass Reize wie die hier verwendeten einen *optokinetischen Nystagmus* erzeugen können. Wade und Mitarbeiter³ haben mit einer vergleichbaren Versuchsanordnung wie der unseren Augenbewegungen und Stärke der Bewegungswahrnehmung bei sinusoidalen Drehbewegungen um die torsionale Achse gemessen. Bei Drehbewegungen lässt sich der induzierte torsionale Nystagmus durch Fixation nicht unterdrücken. Eine innere gemusterte Scheibe (Durchmesser 5°, 20° und 40° Sehwinkel) und eine äussere gemusterte Scheibe mit Kragen (entsprechend einem Sehwinkel von 75°) konnten unabhängig voneinander um eine gemeinsame Achse gedreht werden. Die Versuchspersonen schätzten die Amplitude der Drehbewegungen, wenn die innere oder die äussere Scheibe allein gedreht wurde. Wenn die äussere Scheibe alleine gedreht wurde, betrug die geschätzte Drehamplitude der inneren (stationären) Scheibe 89% (40° Scheibe) und 100% der Amplitude bei Drehungen des ganzen Feldes. Wurde nur die innere Scheibe gedreht, wurde die Drehamplitude der äusseren Scheibe auf 0% – 7% der Amplitude für Ganzfelddrehungen geschätzt.

Der induzierte Drehnystagmus zeigte ein anderes Verhalten. Wurde die äussere Disk allein gedreht, betrug die Nystagmusamplitude zwischen 43% (40° Scheibe) und 78% (5° Scheibe) der Amplitude für Drehbewegungen des ganzen Feldes. Bei alleinigen Drehungen der inneren Scheibe konnte in Abhängigkeit von der Scheibengrösse ein deutlicher Nystagmus indiziert werden (30%–57% der Nystagmusamplitude für Bewegungen des Ganzfeldes). Die Amplitude der indu-

zierten Bewegung korrelierte also nicht mit der Amplitude des Nystagmus. In- und Umfeldbewegungen haben keinen asymmetrischen Einfluss auf den optokinetischen Nystagmus in dem Sinne, dass das Umfeld einen Nystagmus generieren kann, das Infeld aber nicht.

Das Phänomen der Bewegungsinduktion tritt auch bei bewegtem Infeld in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Infeld- und Umfeldtextur auf. In unserem Falle ist es besonders deutlich, wenn sich Infeld- und Umfeldtexturen gegenläufig drehen.

Bei Versuchen, in denen die Drehachsen für die Bewegungen der Infeld- und der Umfeldtextur nicht parallel verliefen, fand ich zusätzliche Effekte der Umfeldtexturbewegung auf die scheinbare Bewegungsrichtung des Infeldes. Die vom Umfeld induzierte Scheinbewegung wich zur Seite der Infeldtextur-Bewegungsrichtung ab.

Scheinbare Bewegungsverlangsamung oder Stabilisation

Die zweite Illusion bezieht sich auf die scheinbare *Verlangsamung oder gar Stabilisation einer bewegten Vordergrundtextur*, wenn sich der Hintergrund hin- und her bewegt.

Die ersten systematischen Beobachtungen scheinbarer Stimulusstabilisation stammen von B.S. Mesland und A.H. Wertheim². Ein Monitor mit einem bewegten Gittermuster wurde auf Schienen hin- und herbewegt. Das bewegte Gitter wurde als auf dem Bildschirm eingefroren oder verlangsamt wahrgenommen. Diese Wahrnehmung schien von der Grösse und Richtung der Geschwindigkeit des Gitters im Verhältnis zu der Geschwindigkeit des Monitors abzuhängen. Die Stabilisierungsidee tritt dann auf, wenn sich Hintergrund und Vordergrundobjekt zur gleichen Seite hin bewegen und der Geschwindigkeitsbetrag der Textur des Vordergrundobjektes in retinalen Koordinaten langsamer als die Geschwindigkeit des Hintergrundes ist. Unsere eigenen Beobachtungen zeigen ähnliche Effekte für Rotationen um vertikale, horizontale und torsionale Drehachsen. Bei Versuchen mit wechselnden Winkeln zwischen der Infeld- und Umfeldtexturdrehachse war die scheinbare Verlangsamung der Infeldbewegung am deutlichsten bei parallelen Drehachsen. Sie nahm mit zunehmendem Winkel zwischen den Drehachsen ab und ver-

schwand bei senkrecht aufeinander stehenden Drehachsen.

Worauf ist diese scheinbare Bewegungsstabilisierung zurückzuführen? Bei einem Gerät, das Bewegungen in der Art eines Filmes Bild per Bild anzeigt wie ein Computermonitor, ist einmal an die *Wagenrad-Illusion*⁵ zu denken: Speichenräder in Filmszenen, die sich die falsche Richtung zu drehen scheinen. Damit dieses Phänomen auftritt, sind Reize mit periodischen Mustern notwendig. Die von uns verwendeten Reize enthalten sehr wenige periodische Muster, wenn überhaupt. Der typische Effekt der Wagenradillusion ist der eine Bewegungsumkehr, welche ich nicht beobachtet habe. Ist auch die Bewegungsverlangsamung durch *induzierte Bewegung* zu erklären? Die wahrgenommene Infeldtexturbewegung wäre das Resultat einer Vektorsubtraktion zwischen Infeld- und Umfeldtexturbewegung. Dies würde auch die scheinbare Bewegungsrichtungsänderung bei nicht parallelen Drehachsen erklären. Aber: bei relativ kleinen Infeldtexturbewegungen würde man eine scheinbare Umkehr der Infeldtexturbewegung erwarten, eine scheinbare Stabilisierung sollte nicht auftreten. Dies ist jedoch nicht der Fall. Der Verlangsamungs- oder Stabilisierungseffekt sollte nicht nur bei oszillierenden Umfeldbewegungen auftreten. Die Illusion hat auch nichts mit der *Filehne-Illusion* zu tun: wenn eine Augenfolgebewegung über einen kurz präsentierten Hintergrund erfolgt, erscheint sich dieser in der Gegenrichtung zu bewegen. Die Illusion ist abhängig von den Versuchsumständen⁶. Bei konstant vorhandenem Hintergrund und heller Umgebung verschwindet sie². Unsere Versuchsanordnung mit einem ortskonstanten Umfeld sollte vermeiden, dass die Versuchsperson glatte Augenfolgebewegungen macht. Ein weiteres Phänomen, welches unsere Illusion der Bewegungsstabilisierung erklären könnte, ist das erstmals 1987 beschriebene Phänomen der *«motion capture»*⁷.

«Motion capture»

Bewegen sich Reize mit niedriger und hoher Ortsfrequenz mit verschiedenen Geschwindigkeiten in ähnlicher Richtung, fangen die Reize mit niedriger Ortsfrequenz die andern Elemente, sodass sich alle mit der gleichen Geschwindigkeit zu bewegen scheinen. Bei dem oben be-

sprochenen Phänomen der «induzierten Bewegung» wird ein Reiz durch einen benachbarten bewegten Reiz so beeinflusst, dass er sich in der Gegenrichtung fortzubewegen scheint. Beim Phänomen der «motion capture» scheint sich der von einem benachbarten bewegten Reiz beeinflusste Reiz mit der gleichen Richtung und Geschwindigkeit zu bewegen wie der induzierende Reiz. Die Umstände, wann das Phänomen der Bewegungsinduktion («induced motion») und wann das Phänomen der «eingefangenen Bewegung» («motion capture») auftritt, sind nur teilweise bekannt. Das Phänomen der induzierten Bewegung tritt eher bei zentralen Reizen mit hohem Kontrast auf, während das Bewegungseinfangen eher bei peripheren Reizen mit niedrigem Kontrast auftritt⁸. Die einzufangenden Elemente sind klein oder haben eine hohe Ortsfrequenz. Sie haben entweder keine kohärente Bewegung oder bewegen sich mit geringer Geschwindigkeit in ähnlicher Richtung wie die fangenden Elemente. Die fangenden Elemente sind gross oder haben eine geringe Ortsfrequenz, sie bewegen sich schneller als die einzufangenden Elemente.

In unserem Falle tritt das Phänomen der Bewegungsstabilisierung dann auf, wenn sich die Umfeldtextur in annähernd gleicher Richtung wie die Infeldtextur bewegt, d.h. wenn die Bedingungen für die Bewegungsinduktion schlecht, aber die Bedingungen für die «motion capture» gut werden. Das Phänomen lässt sich in etwas abgeschwächter Form bei kontinuierlicher Bewegung von Umfeld und Infeld beobachten: ist die Geschwindigkeitsdifferenz genügend klein, scheinen sich beide als Einheit zu bewegen, bei der Verwendung von Zufallspunktmustern verschwinden die Konturen des Infeldes.

Wir verstehen nun auch, wieso die Infeldbewegung kontinuierlich erscheint, wenn sich das Infeld schneller als das Umfeld bewegt: die Bedingungen zu einem erfolgreichen Einfangen des Infeldes durch das Umfeld sind nicht mehr erfüllt.

Wir vermuten, dass sich die von Meslam und Wertheim und die in unserem Labor beobachteten Illusionen durch eine Interaktion der Duncker-Illusion («induzierte Bewegung») mit dem «motion capture» Phänomen erklären lassen.

Die physiologischen Grundlagen beider Phänomene sind im einzelnen nicht be-

kannt. Für beide Illusionen wird ein gemeinsamer Mechanismus diskutiert: die antagonistische Organisation des rezeptiven Feldes der Bewegungsrezeptoren in den verschiedenen Stationen der Bewegungsbahn⁸. Wenn wir diese Hypothese auf unsere Versuche mit In- und Umfelddrehungen um die torsionale Achse anpassen wollen, benötigen wir Drehbewegungsrezeptoren mit verschiedenen Feldgrössen und einer in Abbildung 10 gezeigten antagonistischen Feldstruktur. Das Zentrum würde durch Drehungen im Uhrzeigersinn erregt, das Umfeld des Rezeptors gehemmt. Ein Reiz, der sich im Uhrzeigersinn nach rechts dreht, erregt den Rezeptor, solange der Reiz nicht in das antagonistische Umfeld hinausragt. Optimal wird der Rezeptor dann erregt, wenn ein Vordergrundreiz sein Zentrum bedeckt und sich im Uhrzeigersinn dreht, während sich der Hintergrund im Gegen- uhrzeigersinn dreht (Abb. 10a). Bei stationärem Infeld und Drehung des Hintergrundes im Gegen- uhrzeigersinn wäre der Rezeptor immer noch aktiv und würde eine (scheinbare) Drehung des Reizes im Zentrum signalisieren d.h. eine induzierte Bewegung. Je nach der Drehrichtung des Umfeldes wird die Antwort des Rezeptors auf die Drehung im Zentrum moduliert.

Abbildung 10b veranschaulicht die Verhältnisse bei der «motion capture». Bei geringen Drehgeschwindigkeitsunterschieden von In- und Umfeld wird das Zentrum der Zelle aktiv, für In- und Umfeld wird die gleiche Geschwindigkeit signalisiert.

Wenn wir versuchen, aus bekannten physiologischen Daten Rückschlüsse auf die an unserer Illusion beteiligten Hirnregionen zu schliessen, suchen wir nach einer Region mit grossen rezeptiven Feldern (< 20°) unter Einschluss der fovealen Region, welche auf bewegte grossflächige Reize reagiert. Die Region sollte Neurone erhalten, die auf Translation, Rotation, Expansion/Kontraktion und Bewegungen in der Tiefe reagieren. Diesen Anforderungen entspricht beim Affen zunächst die Region *MSTd*^{9,10} im Parietallappen an der Rückwand des Sulcus supratemporalis. Die selektiven Antworten vieler *MSTd*-Nervenzellen auf sich drehende oder verschiebende grosse Zufallspunktmuster sprechen dafür, dass ihre Hauptaufgabe die Analyse der Eigenbewegung in einer visuellen Umwelt ist. Die rezeptiven Felder der

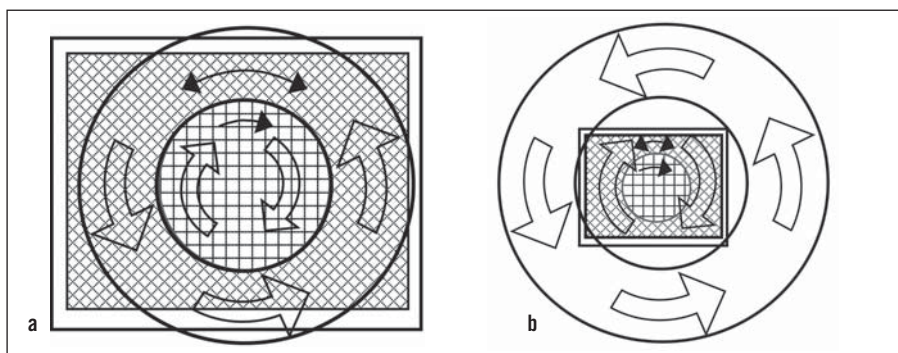


Abb. 10 Hypothetische Drehbewegungsrezeptoren im MSTd mit antagonistischer Zentrums-Umfeld-Organisation. Der Rezeptor besteht aus zwei Subregionen, dem Zentrum («center») und der Umgebung («surround»). Bei Rotation des Reizes (schwarze Pfeile) im Sinne der weiss gefüllten Pfeile wird die entsprechende Subregion erregt, bei Stimulation in der Gegenrichtung gehemmt. Je nach Rezeptor- und Reizgrösse werden Zentrum und Umgebung (a) oder nur das Zentrum (b) erregt. Im Falle (a) würde die vom Rezeptor signalisierte Drehgeschwindigkeit des Infeldes durch das Umfeld moduliert. Im Falle (b) wird die gleiche Geschwindigkeit für In- und Umfeld signalisiert.

Zellen in MSTd zeigen einen komplexen Aufbau ohne eindeutige Gliederung in klar abgrenzbare Subregionen. Es finden sich allerdings Zellen, deren bevorzugte Bewegungsrichtung sich in Abhängigkeit zur Stimulusgrösse ändert, wie es für unser Modell (Abb. 10) erforderlich wäre. Viele Zellen reagieren auf Drehungen um verschiedene Achsen¹⁰. MSTd ist keine rein visuelle Region mehr. Sie enthält Zellen, die während einer glatten Augenfolgebewegung auch im Dunklen noch aktiv sind. Andere Zellen reagieren auch auf vestibuläre Reize¹¹. Insgesamt scheint die Funktion dieser Region die Wahrnehmung der Eigenbewegung im Raum zu sein.

Oberhalb der Region MSTd im Parietallappen im Sulcus supratemporalis liegt die Region 7a (oder PG), worin Sakata und Mitarbeiter¹² Zellen fanden, die selektiv auf Rotationen kleinerer Reize wie kleine Balken reagierten. Diese Rotationszellen («rotation cells») hatten äusserst grosse rezeptive Felder ohne erkennbare Gliederung in Subfelder. Sie reagieren im Vergleich zu den Rotationszellen im MSTd auch auf kleinere Reizobjekte. Die Reaktionen waren weitgehend invariant gegenüber Lageänderungen des Rotationszentrums. In der gleichen Region fanden sich Augenfolgezellen («visual tracking cells»), die während der glatten Augenfolgebewegung aktiv waren¹³. Viele der Augenfolgezellen liessen sich auch durch die Bewegungen eines Rahmens aktivieren, dieweil das Versuchstier einen Punkt innerhalb des Rahmens fixierte, d.h. sie reagierten auf induzierte Bewegung. Daneben fanden sich in dieser

Region auch Zellen, die bei der Fixation aktiv waren («visual fixation cells»)¹⁴. Die Aktivität hing von der Lage und Tiefe des Fixationsobjektes ab. Die Hauptfunktion dieser Region steht in Beziehung mit der Wahrnehmung und Verfolgung von Objekten im Raum. Leider fehlen weitergehende neurophysiologische Studien mit Vorder- und Hintergrundreizen in dieser Region. Wir können uns gut vorstellen, dass die Region 7A das physiologische Substrat unserer Bewegungsillusion darstellt.

Beim Menschen liegt die dem MT/MST-Komplex der Rhesusaffen entsprechende Region MT+ im hintersten, aufsteigenden Teil des Schläfenlappens¹⁵ und umfasst den hintersten Abschnitt des Sulcus temporalis superior und die hinteren Teile des Gyrus temporalis medialis und inferior. Die Entsprechungen von MT+ mit 7a, die bei der glatten Augenfolgebewegung aktiv sind, liegen dabei im vordersten Anteil.

Einige der für die Demonstration erstellten Kurzfilme hat der Autor im Internet zugänglich gemacht (<http://web.unispital.ch/Neurologie/vest/MotionIllusion>).

Danksagung

Stefan Hegemann schulde ich Dank für seine in der Einleitung erwähnten Beobachtungen mit einem HMD sowie für seine Kommentare. Dominik Straumann danke für den Anstoss und seine hilfreichen Kommentare zu diesem Artikel, Erika Lorincz und Chris Bockisch für ihre Hilfe bei den fremdsprachlichen Zusammenfassungen.

Korrespondenz

Dr. med. Max R. Dürsteler
Neurologische Klinik des USZ
Frauenklinikstrasse 26, 8091 Zürich
max.duersteler@usz.ch

Literatur

- 1 Duncker K. Über induzierte Bewegung (Ein Beitrag zur Theorie optisch wahrgenommener Bewegung.) Psychol. Forschung 12:180-259. 1929
- 2 Meslam. B.S., Wertheim A.H. A puzzling percept of stimulus stabilization. Vision Res. 36: 3325-3328. 1996
- 3 Wade N.J., Swanston M.T., Howard I.P. Ono H. and Shen X. Induced rotatory motion and ocular torsion. Vision Res. 31:1979-1983. 1991
- 4 Gamphe E., Gamlin P. The Duncker illusion affects the perception of targets moving in depth [Abstract]. J. of Vision 3(9):860a. 2003
- 5 Purves D., Paydarfar J.A. und Andrews T.J. The wagon wheel illusion in movies and reality. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 93:3693-3697. 1996
- 6 Haarmeier T., Theier P. Modification of the Filehne illusion by conditioning visual stimuli. Vision Res. 36:741-750. 1996
- 7 Ramachandran V.S. und Cavanagh P. Motion Capture Anisotropy. Vision Res. 27:97-106. 1987
- 8 Murakami, I., Shimojo S. Motion capture changes to induced motion at higher luminance contrasts, smaller eccentricities, and larger inducer sizes. Vision Res. 33:2091-2107. 1993
- 9 Tanaka K. und Saito H. Analysis of motion of the visual field by direction, expansion/contraction, and rotation cells clustered in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. J. Neurophysiol. 62:626-641, 1989
- 10 Duffy C.J. und Wurtz R.H. Sensitivity of MST neurons to optic flow stimuli. I. A continuum of response selectivity to large-field stimuli. J. Neurophysiol. 65: 1329-1345. 1991
- 11 Page W.K. und Duffy C.J. Heading representation in MST: sensory interactions and population encoding. J. Neurophysiol. 89:1994-2013. 2003
- 12 Sakata H., Shibutani H., Ito Y., Tsurugai K., Mine S., Kusunoki M. Functional properties of rotation-sensitive neurons in the posterior parietal association cortex of the monkey. Exp. Brain Res. 101:183-202. 1994
- 13 Sakata H., Shibutani H. und Kawano K. Functional properties of visual tracking neurons in posterior association cortex of the monkey. J. Neurophysiol. 49, 1364-1380, 1983
- 14 Sakata H., Shibutani H. und Kawano K. Spatial properties of visual fixation neurons in posterior parietal association cortex of the monkey. J. Neurophysiol. 43: 1654-1672. 1980
- 15 Dukelow S.P., De Souza J.F.X., Culham J.C., van den Berg A.V., Menon R.S. und Vilis T. Distinguishing subregions of the human MT+ complex using visual fields and pursuit eye movements. J. Neurophysiol. 86, 1991-2000. 2001