

Abb.1: Demonstration der "topologischen" Niemandsländer nach Julesz: Zusammenschieben oder -starren benachbarter random-dot-Muster ergibt ein Quadrat, das vor bzw. hinter der Fläche "schwebt". Die topologischen Niemandsländer liegen rechts und links neben dem schwebenden Quadrat. Sie sind jeweils 3 Musterelemente breit und machen den Ausschnitt zum Rechteck.

• Fragestellung

Wieviel Zeit benötigt unser Gehirn zum 3D-Sehen?

Betrachtet man pseudoskopisch ein undurchsichtiges Quadrat, das räumlich *vor* einer zufallsgemusterten Fläche liegt, so erscheint das Quadrat in einem rechteckigen Ausschnitt *hinter* dieser Fläche. Bewegt sich das Muster, das räumlich *vor* dem Rechteck wahrgenommen wird, vertikal, so nimmt man an der in Bewegungsrichtung vorderen Kante des Rechtecks eine illusionäre Lücke wahr (Delayed Stereopsis Illusion DSI, Abb.2B). Diese Lücke trägt das Muster der bewegten Fläche, ihre Tiefenposition aber ist unbestimmt - sie wird irgendwo zwischen Quadrat- und Flächenebene wahrgenommen. Analog zu Bela Julesz' (topologischen) „Niemandsländern“ an den beiden vertikalen Rändern des Quadrates, bezeichnen wir diese DSI-Lücke als „rechenzeitbedingtes Niemandsland“. Denn anhand der Breite z_g dieser Lücke, deren äußeren Rand wir unter definierten Versuchsbedingungen von Probanden markieren lassen, kann man die Verrechnungszeit bestimmen, die das Gehirn für die Bestimmung der Tiefenposition des quasi aus dem "Nichts" auftauchenden Musters benötigt.

• Methode

Messdaten wurden psychophysisch mit einer mechanischen Apparatur sowie einem computer-generierten Modellsystem gewonnen. Zugrunde liegt ihm die Software „Bino 2.4“, die mit Hilfe der Multimedia-Programmierschnittstelle DirectX 5.2 von Frank Scheiner, Rechenzentrum der Universität Würzburg, 1999 programmiert wurde und unter Windows 95 und 98 läuft. Zur 3D-Darstellung der DSI wurden zwei verschiedene Modi gewählt: Beim Modus "2RD" wird das Random-dot-Muster durch zwei nebeneinander stehende Halbbilder präsentiert, die zur Fusion von den Versuchspersonen "zusammenschieben" sind (Abb.2), Modus "S" erzeugt den Tiefeneffekt durch eine Shutterbrille und entsprechend synchronisiertem Bildwechsel am Monitor.

Die Bewegungsgeschwindigkeit v der Fläche im Vordergrund wird vom Versuchsleiter per Tastatur eingestellt. Die VP messen den DSI-Effekt, indem sie die subjektiv wahrgenommene Breite z des "rechenzeitbedingten Niemandslandes" durch eine rote Linie am rechten oberen Rand des Quadrats markieren. Die verschiedenen Werte von v werden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Raumfrequenz und Beschaffenheit der Muster von Fläche und Quadrat können vor jedem Experiment per Software variiert werden.

• Ergebnisse

Die Experimentalserie E1 lieferte für Bewegungsgeschwindigkeiten des Flächenmusters von 0 bis etwa $v_{max}=2,9^\circ/s$ eine 3D-Verrechnungszeit von $t=270ms$, abzulesen an der Steigung der Regressionsgeraden durch den Ursprung (Abb.3). In der zweiten Experimentalserie E2 konnte der Geschwindigkeitsbereich durch Verbesserung der Hardware auf bis zum Wert $v_{max}=8,8^\circ/s$ ausgedehnt werden (Abb.4 u.5).

Variation der Raumfrequenz der Muster von Fläche und Quadrat sowie der Anzahl der "Ankerpunkte" durch Variation des Zufallspunkte-Musters ergaben keine signifikanten Abweichungen im Vergleich zum Standardmuster (Größe der Zufalls-Musterelemente von Fläche und Quadrat jeweils 2×2 Pixel, Häufigkeit von Schwarz zu Weiß 50:50, vgl. Abb.4). Die Wahrnehmungsdaten der Versuchspersonen haben sich im Lauf des Versuchs nicht geändert: Es gab weder systematische Lerneffekte noch Veränderungen in den Streuungen der Messdaten.

Die ursprüngliche Annahme, dass die 3D-Verrechnungszeit, die sich aus dem "rechenzeitbedingten Niemandsland" ergibt und Mustererkennung sowie 3D-Verrechnung einschließt, über alle Geschwindigkeiten des Musters konstant ist, hat sich nicht bestätigt. Vielmehr erkennt man in Abb.5 mindestens zwei Bereiche, in denen die Breite des rechenzeitbedingten Niemandslandes mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit annähernd linear anwächst: Bei Werten unter einem Schwellenwert von etwa $v_S=2,5^\circ/s$ ergeben sich Verrechnungszeiten von bis zu 290 ms, die ab $2,5^\circ/s$ aber (für $v_{max}=8,8^\circ/s$) bis auf unter 130 ms sinken.

• Schlussfolgerungen

Auch beim 3D-Sehen scheint es *unterschiedliche Verarbeitungswege für schnelle und langsame Bewegungen* zu geben, wie sie Gegenfurtner et al. (Trends Neurosci 19:394-401,1996) beschreiben, die für unterschiedliche Verrechnungszeiten verantwortlich sind: Bei hohen Objektgeschwindigkeiten wird offensichtlich ein schnellerer Verrechnungsweg eingeschlagen. In jedem Fall ist die Mindestpräsentationszeit von knapp 17 ms, bei der die Julesz'schen "dynamic random-dot-Stereogramme" gerade noch erkannt werden, viel zu kurz, um die Tiefenpositionen bei jedem Bildwechsel jedes Mal neu zu errechnen. Vielmehr scheint das Sehsystem - vielleicht anhand von "Stichproben" - lediglich zu überprüfen, dass sich die Tiefenverhältnisse *nicht* verändert haben, und hält das Perzept des schwebenden Quadrats solange aufrecht.

Lerneffekte und Parameter wie Raumfrequenzen (s.o.), Disparität zwischen Quadrat und bewegter Fläche, Augenfolgebewegungen und Helligkeit (Daten hier nicht dargestellt) hatten keinen messbaren Einfluss auf die Breite der DSI-Lücke. Falls es sich bestätigen sollte, dass die 3D-Verrechnungszeit durch Abdunkeln *nicht* verlängert wird, wäre dies ein Indiz dafür, dass der Pulfrich-Effekt *nicht* durch verzögerte Erregung des abgedunkelten Auges verursacht wird, sondern durch laterale Hemmung (v.Campenhausen, Die Sinne des Menschen, 1996).

• Ausblick

Weitere Experimente sollen den Schwellenwert, der aus den bisher gewonnenen Ergebnissen empirisch auf etwa $v_S=2,5^\circ/s$ abgeschätzt wurde, genauer identifizieren und festlegen. Die Ergebnisse laufender DSI-Experimente im Übergangsbereich zwischen photopischem und skotopischem Sehen werden darüber entscheiden, welche der oben genannten, alternativen Erklärungen des Pulfrich-Effekts zutrifft.

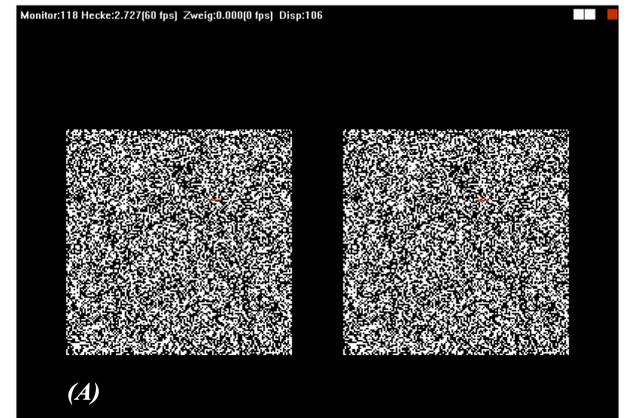


Abb.2: (A) Monitorbild der Software Bino 2.4 im Modus "2RD" mit zwei Halbbildern, die von der VP zusammen zu schieben sind (s. Abb.1). Im Experiment bewegt sich das Flächenmuster vertikal nach oben, das ruhende Quadrat wird - wie in (B) dargestellt - räumlich hinter dem Vordergrund wahrgenommen. Der DSI-Effekt entsteht am oberen Rand des Quadrats. Seine Breite wird vom Probanden mit einer roten Markierung eingestellt. **(B)** Diagramm zur DSI-Effekt-Einstellung: Ein vertikales Quadrat ist dargestellt. Eine rote Markierung am oberen Rand des Quadrats zeigt die subjektiv wahrgenommene Breite der Lücke an. Die Blickrichtung ist nach rechts gerichtet. Die bewegte Fläche ist nach oben gerichtet, das ruhende Quadrat ist nach unten gerichtet.

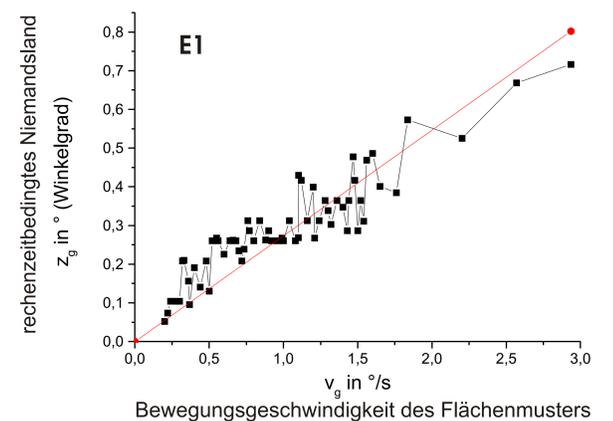


Abb.3: Experimentalserie E1 mit Regressionsgerade durch den Ursprung.

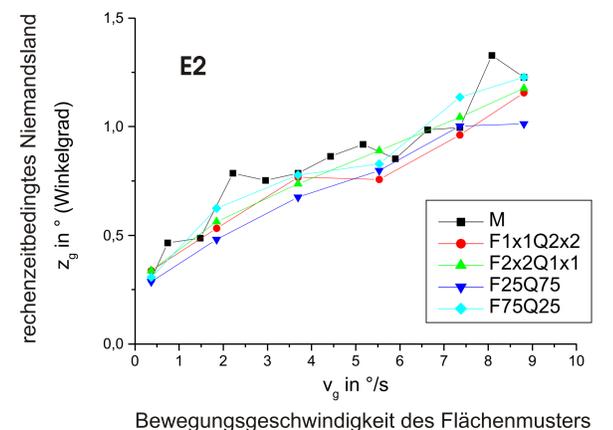


Abb.4: Experimentalserie E2, M: Standardmuster, variierende Raumfrequenz (1x1 vs. 2x2 Pixel pro Muster-element) der Muster von Quadrat Q und Fläche F bzw. mit variierender Beschaffenheit der Muster (F25Q75: Häufigkeit der schwarzen Pixel bei F: 25%, bei Q: 75%, F75Q25: analog).

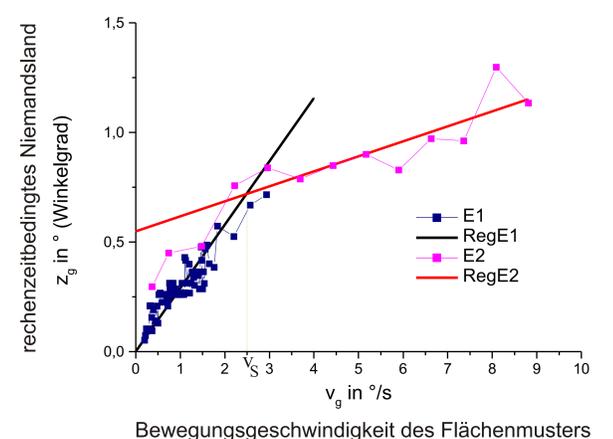


Abb.5: Fasst man die Daten von E1 und E2 zusammen, erkennt man bei etwa $v=2,5^\circ/s$ einen "Knick", dargestellt durch die Regressionsgeraden für $v < 2,5^\circ/s$ bzw. $2,5^\circ/s < v < 8,8^\circ/s$.