

Aus urheberrechtlichen Gründen  
können wir Ihnen die Bilder leider  
nicht online zeigen.

WAHRNEHMUNG OPTISCHE ILLUSIONEN

# DIE RÄTSELHAFTE WASSERFALLTÄUSCHUNG

Wer längere Zeit eine gleichmäßig fließende Bewegung betrachtet, hat anschließend den Eindruck, alles andere würde sich in die Gegenrichtung bewegen. Der Grund: Ermüdete Nervenzellen führen das Gehirn aufs Glatteis.

VON JEAN LORENCEAU

**V**ertieft in seine Gedanken, sieht er dem munter fließenden Wasser des Flusses zu, aus dem sein Pferd säuft. Nach einigen Sekunden richtet er seinen Blick zum wolkenübersäten Himmel. Alles scheint sich plötzlich in entgegengesetzter Richtung zum Strom zu bewegen, bis sich dieser Eindruck langsam wieder verflüchtigt.« Mit diesen Worten beschrieb schon im 1. Jahrhundert v. Chr. der römische Dichter und Philosoph Titus Lucretius Carus die so genannte Wasserfalltäuschung. Der

skurrile Bewegungsnacheffekt entsteht, wenn Sie längere Zeit etwas betrachten, das sich gleichförmig in eine bestimmte Richtung bewegt – beispielsweise eben einen Wasserfall. Richten Sie danach Ihren Blick auf etwas Statisches, scheint dieses plötzlich in die umgekehrte Richtung abzudriften.

Lange rätselten Forscher vergeblich über die Ursache dieser optischen Täuschung. Doch inzwischen haben Psychologen und Zellphysiologen die zu Grunde liegenden Mechanismen aufgedeckt. Und nicht nur das: Bei der Erforschung des Effekts fanden sie auch viel darüber

heraus, wie wir Farben, Formen und Bewegungen überhaupt wahrnehmen.

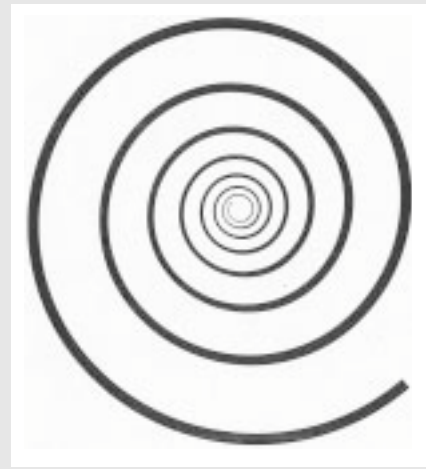
Übrigens – um die Illusion hervorzu-rufen, müssen Sie nicht eigens zu den Niagarafällen reisen. Es genügt, eine Kopie der Spirale rechts oben auf ein Stück Karton zu kleben und diesen in der Mitte mit einem Nagel oder einer Büroklammer zu durchstechen. Nun drehen Sie die Spirale etwa eine Minute lang mit konstanter Geschwindigkeit im Uhrzeigersinn, während Sie aufmerksam ihr Zentrum fixieren. Während der Adaptation nimmt die subjektiv empfundene Rotationsgeschwindigkeit zunächst

## REINE EINBILDUNG

Betrachtet man einige Minuten lang einen Wasserfall und schaut danach zur Seite, scheint die umgebende Landschaft nach oben zu gleiten.

## DREHWURM MIT FOLGEN

Fotokopieren Sie diese Figur, kleben Sie sie auf einen Karton, stechen in die Mitte ein Loch und drehen Sie sie. Beobachten Sie das rotierende Muster eine knappe Minute und schließen Sie dann die Augen. Wenn sich die Spirale so drehte, dass sie eine Expansionsbewegung vortäuschte, so nehmen Sie nach dem Schließen der Augen eine Kontraktion wahr – und umgekehrt.



CERVEAU & PSYCHO

allmählich ab und stabilisiert sich dann auf einem niedrigeren Niveau. Dieser Effekt ist zum Beispiel auch die Ursache dafür, dass nach langer Fahrt mit hoher Geschwindigkeit an Autobahnausfahrten häufig Verkehrsunfälle auftreten: Das eigene Tempo erscheint viel niedriger, als es tatsächlich ist!

## VERZERRTES GESICHT

Halten Sie nun die Spirale an und richten den Blick auf eine homogene Fläche, zum Beispiel ein weißes Blatt Papier – den Testreiz. Dort nehmen Sie nun eine Bewegung im Gegenuhrzeigersinn wahr – zunächst schnell, dann immer langsamer, bis sie schließlich ganz verschwindet. Dieser Bewegungsnacheffekt hält etwa 15 Sekunden lang an. Andere Testreize führen mitunter zu recht überraschenden Ergebnissen. So verzerrt sich zum Beispiel ein vertrautes Gesicht auf skurrilste Weise. Probieren Sie es einmal aus!

Gleicht der Testreiz dem ursprünglichen Adaptationsreiz stark, können die Nacheffekte sehr lange anhalten und oft auch später von neuem ausgelöst werden. Beispielsweise kann die Spirale – nun als Testreiz präsentiert – selbst noch nach einigen Tagen einen Bewegungsnacheffekt hervorrufen.

Solche optischen Täuschungen sind nicht auf Bewegungen beschränkt. So lässt sich ganz einfach ein Farbnacheffekt erzielen, wenn man eine Minute lang den pinkfarbenen linken Teil des

Bildes unten betrachtet und dann sofort auf den schwarz-weißen Bereich rechts davon schaut. Dieser dürfte nun grünlich erscheinen. Zwar verschwindet der Eindruck nach wenigen Sekunden wieder, mehrmaliges schnelles Augenzwinkern kann ihn jedoch einige Zeit lang erneut aktivieren.

Auch in anderen Sinnesmodalitäten finden sich derartige Täuschungen. Streicht man zum Beispiel längere Zeit mit dem Finger über die Kante einer runden Scheibe und fährt dann ein gerades Lineal entlang, erscheint dieses in die entgegengesetzte Richtung gekrümmt. Ebenso beruht der Verlust des Gleichgewichts nach einer Schiffsreise auf unserer zwischenzeitlichen Anpassung an das ständige Schwanken.

Doch wie produzieren die Neurone unseres Gehirns diese rätselhaften Vorgänge? Schon Anfang der 1960er Jahre gingen die amerikanischen Neurophysiologen Horace Barlow und Dick Hill dieser Frage nach. Dazu richteten sie ihr Augenmerk auf eine Klasse von Nervenzellen, die ausschließlich auf Bewegungen in einer bestimmten Richtung reagieren. Mittels einer Elektrode zeichneten sie die elektrischen Antworten eines solchen richtungsspezifischen Sehneurons bei Hasen auf.

Die Forscher beobachteten zunächst, dass die abgeleitete Nervenzelle ohne passenden Reiz nur gelegentlich elektrische Impulse sendet – das ist die so ge-

nannte Spontanaktivität der Zelle. Sobald sich etwas im Sichtfeld von Meister Lampe in die »richtige« Richtung bewegte, erhöhte sich die Feuerrate jedoch schlagartig. Reizten die Wissenschaftler die Zelle kontinuierlich weiter, schien sie allmählich zu ermüden und produzierte immer weniger Impulse.

Als Barlow und Hill die Stimulation schließlich beendeten, fiel die registrierte Nervenzellaktivität deutlich unter die anfängliche Spontanaktivität – und kehrte nur langsam wieder auf das ursprüngliche Niveau zurück. Dabei zeigte sich, dass sich das Neuron exakt genauso schnell erholte, wie die Nacheffekte abklingen. Diese frühen Versuche ließen also bereits vermuten, dass die Täuschungen tatsächlich direkt auf der Neuronenaktivität beruhen.

## ALLES IST RELATIV

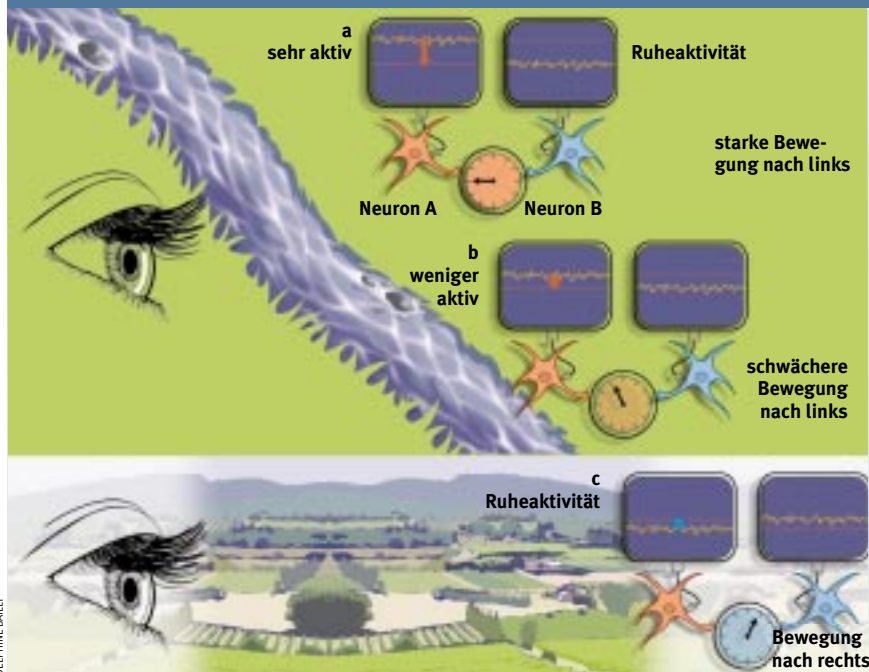
In der Tat basiert unsere Bewegungswahrnehmung nicht etwa auf den absoluten Aktivitätsniveaus aller bewegungssensitiven Zellen, sondern entsteht dadurch, dass unser Gehirn die Feuerraten miteinander vergleicht. Bei der Wasserfalltäuschung feuern nun die ermüdeten richtungsspezifischen Zellen im Ruhezustand weniger als jene Sehneurone, die für die entgegengesetzte Richtung zuständig sind. Diese hatten nicht auf den Wasserfall reagiert, sind quasi noch ausgeruht und produzieren eine höhere Spontanaktivität. Konsequenter-, aber auch ▶



## FARBSPIEL

Decken Sie die rechte Bildhälfte ab und betrachten Sie eine Minute lang die pinkfarbenen Streifen. Danach wechseln Sie zu den schwarzen. Bei der grünen Farbe, die Sie zwischen den Balken wahrnehmen, handelt es sich um einen Nacheffekt.

## WETTKAMPF DER NEURONE



**BETRACHTEN WIR EINEN FLUSS**, der nach links fließt, so stimuliert dies ein richtungsspezifisches Neuron A, das auf Bewegungen nach links spezialisiert ist – jedoch nicht ein Neuron B, das nur auf Bewegungen nach rechts reagiert (a). Im Vergleich beider Aktivitäten gewinnt Neuron A: Wir nehmen eine Bewegung nach links wahr (schematisch dargestellt durch den Uhrzeiger).

Allmählich ermüdet das Neuron A und die Bewegungsempfindung nimmt ab (b). Wenden wir schließlich den Blick vom Fluss auf die Landschaft, fällt die Ruheaktivität von A unter die von B und die Bilanz schlägt um: Jetzt bewegt sich die Landschaft scheinbar nach rechts (c).

▷ irrtümlicherweise schließt das Gehirn aus dem resultierenden Aktivitätsunterschied auf eine entgegengesetzt gerichtete Bewegung (siehe Kasten oben).

Diesen Mechanismus konnten vor kurzem die amerikanischen Neurowissenschaftler Adam Kohn und Anthony Movshon von der New York University experimentell bestätigen. Sie zeigten Affen eine Reihe sich nach unten bewegendes Bilder und registrierten dabei die Neuronenaktivität in den entsprechenden Hirnzentren. Ergebnis: Die auf Abwärtsbewegungen spezialisierten Zellen ermüdeten zunehmend – im Gegensatz zu denjenigen Neuronen, die nur für Hochwanderndes zuständig sind.

Doch das allein erklärt nicht, dass noch nach mehreren Tagen Nacheffekte auftreten können – und zwar umso länger, je mehr Aufmerksamkeit der Beobachter der Dauerbewegung ursprünglich gewidmet hat. Neue Erkenntnisse vermitteln nun moderne bildgebende Methoden der Hirnforschung. Sie ermöglichen es, sichtbar zu machen, welche Regionen unseres Denk- und Wahrnehmungsorgans durch eine bestimmte Reizung aktiviert werden.

Mit Hilfe der funktionellen Kernspinnresonanztomografie identifizierten jüngst Jody Culham und ihre Kollegen von der University of Western Ontario einen Bereich des Gehirns, der an der Entstehung dieser Effekte beteiligt ist: das so genannte Areal V5, ein höheres Zentrum der Sehrinde, das speziell Bewegungen analysiert. Die US-Forscher

entdeckten, dass sich das Aktivitätsmuster dieser Hirnregion exakt parallel zu den Bewegungsnacheffekten verhält. Und zwar auch dann, wenn mehrere Minuten zwischen Gewöhnungs- und Testphase vergehen.

### ERINNERUNG AN AUSLÖSEREIZ

Möglicherweise behält also das neuronale Netzwerk, das die Bewegungsinformation verarbeitet, eine Art Erinnerung an diesen bestimmten Auslösereiz zurück, wie zum Beispiel an die Spirale. Kommt nun derselbe Reiz wieder – dieses Mal unbewegt – ins Blickfeld, feuert das Netzwerk genauso wie direkt nach der Adaptation.

Dieses Beispiel zeigt: Nacheffekte können uns helfen, besser zu verstehen, wie das visuelle System generell funktioniert. Denn sie verraten uns, für welche Eigenschaften des Gesehenen bestimmte spezifische Nervenzellen im Gehirn zuständig sind. So etwa für die Farbnacheffekte: Nachdem wir eine Zeit lang einen pinkfarbenen Balken angestarrt haben, glauben wir danach in jedem Fall einen grünen Balken zu sehen und nicht etwa einen blauen oder einen Kreis. Bei einer anderen Farbe oder Form resultiert ein entsprechend unterschiedlicher, aber immer ganz spezifischer Nacheffekt.

Im Gegensatz dazu hat jedoch etwa die Drehgeschwindigkeit der Spirale praktisch keinen Einfluss darauf, wie die nachfolgende Sinnestäuschung aussieht. Für die Geschwindigkeit eines Reizes

scheint also keine definierte Gruppe von Nervenzellen zuständig zu sein.

Aber wieso kann man dann nicht an ein Gesicht, eine Blume oder ein Auto adaptieren? Die Antwort dürfte lauten, dass solche komplexen Dinge wohl nicht von einer Zelle allein oder einer isolierten Gruppe von Neuronen verarbeitet werden, sondern von einem komplizierten Netzwerk aus Zellen, die miteinander in Verbindung stehen. Hier ist also nicht das Aktivitätsniveau der beteiligten Neurone entscheidend, sondern vor allem die zeitliche Impulsfolge der entsprechenden Zellen. Und dabei ist es gleichgültig, ob die Neurone müde werden und dadurch das mittlere Aktivitätsniveau der Zellen absinkt. Daher hängt die Wasserfalltäuschung auch nicht von einem konkreten Wasserfall oder Fluss ab, an den wir ja nicht adaptieren können, sondern nur von seiner charakteristischen Eigenschaft: dem gleichförmigen Fließen. ◀

JEAN LORENCEAU ist Forschungsdirektor am CNRS in Gif-sur-Yvette bei Paris.

### Literaturtipps

**Barlow, H.B., Hill, R.M.:** Evidence for a Physiological Explanation of the Waterfall Phenomenon and Figural After-Effects. In: Nature 28, 1963, S. 1345–1347.

**Kohn, A., Movshon, J.A.:** Neuronal Adaptation to Visual Motion in Area MT of the Macaque. In: Neuron 39, 2003, S. 681–691.