



ZEITSCHRIFT FÜR PRAKTISCHE AUGENHEILKUNDE
& AUGENÄRZTLICHE FORTBILDUNG

NOVEMBER 2018 | 39. JAHRGANG | 11. HEFT

Subjektive und objektive Messungen der Fixationsdisparität: Noniustest versus Eye-Tracker

WOLFGANG JASCHINSKI
DORTMUND



Subjektive und objektive Messungen der Fixationsdisparität: Noniustest versus Eye-Tracker

WOLFGANG JASCHINSKI
DORTMUND

Zusammenfassung: Die mit Noniuslinien gemessene („subjektive“) Fixationsdisparität wird seit Jahrzehnten in Forschung und Klinik eingesetzt. Mit heutigen Video-Eye-Trackern werden auch „objektive“ Messungen möglich. Die Diskrepanzen zwischen Messwerten beider Varianten werfen Fragen nach der physiologischen und klinischen Bedeutung auf. Dieser Beitrag fasst den aktuellen Forschungsstand zusammen.

Summary: The „subjective“ fixation disparity (measured with nonius lines) is used in research and clinic since several decades. Today, video Eye-Tracker also allow for “objective” measurements. The discrepancy between the results of both methods queries the physiological and clinical relevance. This review summarizes the current state of research.

Z. prakt. Augenheilkd. 39: 339–346 (2018)

Z. prakt. Augenheilkd. 39: 339–346 (2018)

Fixationsdisparität

Die korrekte Stellung der beiden Augen zueinander ist die erste Voraussetzung für ein gutes Binokularsehen. Im Idealfall stellen die äußeren Augenmuskeln exakt den geometrisch erforderlichen Vergenzwinkel zwischen den Sehachsen ein.

Beim Vorliegen einer Fixationsdisparität kommt es zu messbaren Ungenauigkeiten des Vergenzsystems, zu winzigen Vergenzfehlstellungen bei Personen, die nicht schielen. Die Gesichtslinien beider Augen treffen sich dadurch nicht mehr genau in einem fixierten Objekt, sondern

entweder in geringem Abstand dahinter (Exodisparität) oder davor (Esodisparität). Da sich der Punkt, an dem sich die Gesichtslinien kreuzen, noch innerhalb des Panum-Areals befindet, kommt es nicht zu Doppelbildern (Abbildung 1).

Deutliche Vergenzfehlstellungen, z. B. beim Strabismus, lassen sich mit dem Cover-Test durch Beobachtung der Einstellbewegungen beurteilen. Doch auch bei normalem Binokularsehen und bei Fusion innerhalb des Panum-Areals können Vergenzfehlstellungen vorkommen, die dann aber erheblich kleiner sind und geeignete Messverfahren erfordern (Abbildung 1).

Die instrumentell einfachsten Vergenzmessverfahren beruhen darauf, dass der Proband die Vergenzstellung selbst beurteilt. Dies klingt überraschend, ist aber der Kern der subjektiv genannten Messverfahren. Beim Maddox-Zylinder-Test wird vor ein Auge ein Maddox-Zylinderglas gehalten, während der Patient mit dem anderen Auge eine punktförmige Lichtquelle fixiert. Der Patient muss dann angeben, wo er den Strich, der durch das Maddox-Zylinderglas gesehen wird, in Relation zum Fixierpunkt sieht (Kasten, Abbildung 2). Die Heterophorie erscheint so als der wahrgenommene Versatz von

zwei nicht fusionierbaren, monokularen Testobjekten, d.h. es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen Netzhautstellen und Raumrichtungen, durch die die motorische Vergenzposition bestimmt werden kann.

Ein weiterer subjektiver Test ist der Maddox-Wing-Test für die Nähe, bei dem einem Auge eine Winkelskala und dem anderen ein Pfeil dargeboten

wird. Die beiden Augen erhalten keinen Fusionsreiz, um eine Heterophorie zu erzielen.

Für Fusionstests fügten schon Hofmann und Bielschowsky im Jahre 1900 einen zentralen binokularen Reiz hinzu, um durch die Lage der Pfeilspitze auf der Skala den daraus resultierenden sogenannten „Disparationsrest“ bestimmen zu können. Sie konnten nach-

weisen, dass dieser mit zunehmender Prismenbelastung ansteigt [9]. K. N. Ogle prägte dafür den englischen Begriff „fixation disparity“, wofür im Deutschen „Fixationsdisparität“ üblich wurde [24]. Die Autoren gingen bei der Konstruktion ihrer Apparaturen implizit davon aus – wie dann ebenfalls D. B. Carter, J. E. Sheedy oder R. J. F. Mallett –, dass auch bei Fusion die jedem Auge sepa-

Maddox-Test

Der Maddox-Zylinder ist eine Vorhaltelinse aus transparentem rotem Material, das Maddox-Kreuz eine kreuzförmige Mess-Skala, in deren Zentrum sich eine weiße Lichtquelle befindet.

Einem Auge wird zusätzlich ein Maddox-Zylinder vorgehalten, wodurch dieses eine rote Linie sieht. Das andere Auge sieht den weißen Lichtpunkt des Maddox-Kreuzes. Durch die Präsentation der unterschiedlichen Bilder entfällt der Fusionszwang.

Liegt keine Heterophorie vor, erscheint das weiße Licht mittig auf der roten Linie. Liegt eine Abweichung der beiden Blickrichtungen vor, wird das weiße Licht rechts oder links von der weißen Linie wahrgenommen. Die Abweichung kann auf der Skala des Maddox-Kreuzes abgelesen werden.

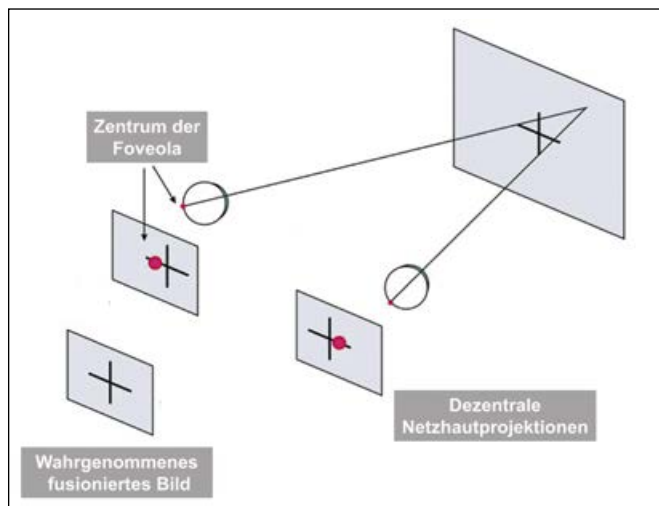


Abbildung 1: Im Falle einer Fixationsdisparität wird das Kreuz versetzt vom Zentrum der Foveola (roter Punkt) fixiert und daher mit einer Disparität auf den Netzhäuten abgebildet. Durch sensorische Fusion im Panum-Raum wird das Kreuz einfach gesehen.

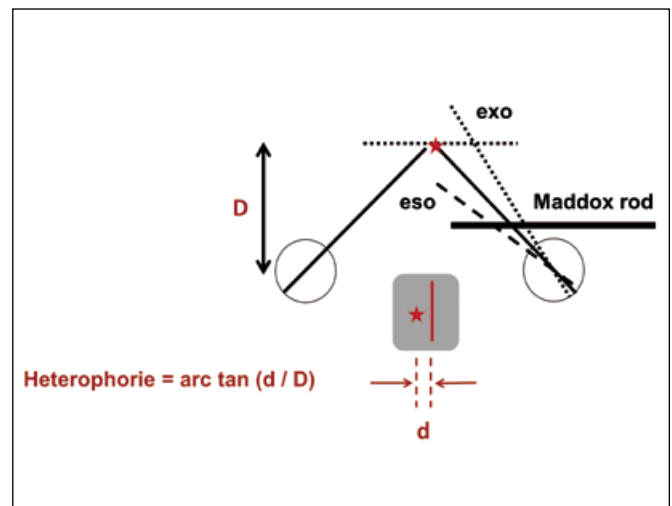


Abbildung 2: Subjektive Messung der Heterophorie mit dem Maddox-Test. Bei diesem Test gibt der wahrgenommene Versatz d von Sternchen und Strich die Heterophorie an, d.h. die Vergenzfehlerstellung relativ zur Sehdistanz D der Testreize (ohne die Anwendung von Prismen).

rat angebotenen Bildobjekte die Vergenzfehlstellung und damit die Stellung der Sehachsen angeben [1, 23, 27].

Diese Vorstellung war in einer Zeit ohne Eye-Tracker auch plausibel und wurde zunächst auch 1962 von F. W. Hebbard bestätigt, der erste präzise physikalische Messungen mit einer Lichtstrahlablenkung durch einen Spiegel auf einer Kontaktlinse an einer Person durchführte: Die so objektiv gemessene Fixationsdisparität (oFD) entsprach der subjektiv mit Noniuslinien gemessenen Fixationsdisparität (sFD) [6].

Erst als ab den 1980er Jahren die Messmethoden für Augenbewegungen in der Forschung mit dem „Dual Purkinje Eye-Tracker“ und den „Scleral Search Coils“ sehr präzise wurden, mehrten sich die Hinweise, dass die subjektiven

Messergebnisse signifikant von den objektiven Messergebnissen abweichen [2, 18, 19]. Diese Forschungen führten zu der Modellvorstellung, dass bei einer bestimmten motorischen Vergenzfehlstellung eine sensorische Richtungsverschiebung für die Noniuslinien vollzogen wird („change in retinal correspondence“). Dies führt dazu, dass die subjektive Fixationsdisparität typischerweise kleiner ist als die objektive Fixationsdisparität (Abbildung 3).

Die objektive Fixationsdisparität bezieht sich auf die motorische Stellung der Sehachsen und gibt den Vergenzfehler aufgrund von Messungen mit dem Eye-Tracker an; die subjektive Fixationsdisparität bezieht sich nicht auf die Stellung der Sehachsen, sondern gibt den Sehwinkel des Noniusversatzes an.

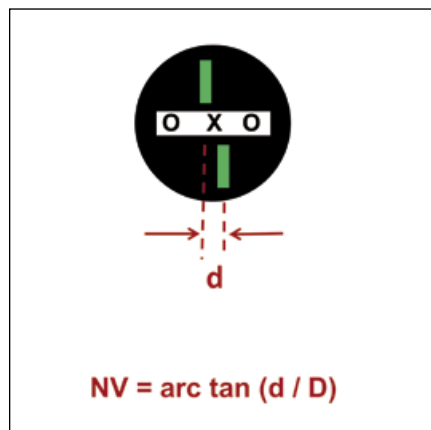


Abbildung 3a: Definition der zwei Varianten der Fixationsdisparität. Die subjektive Wahrnehmung des Noniusversatzes, die subjektive Fixationsdisparität, ergibt sich bei einem Sehabstand D als Sehwinkel des physikalischen Noniusversatz d , den man auf einem Bildschirm einstellen muss, damit der Proband die Linien übereinander wahrnimmt.

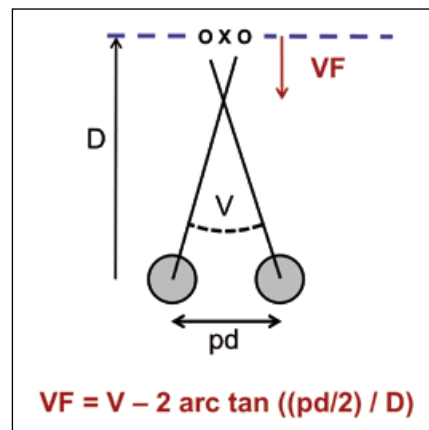


Abbildung 3b: Objektive Eye-Tracker-Messung der Vergenzfehlstellung. Die objektive Fixationsdisparität ist die mit einem „Eye-Tracker“ gemessene Vergenzfehlstellung relativ zur optimalen Vergenzstellung, die sich aus der Pupillendistanz pd und dem Sehabstand D ergibt. Der Eye-Tracker ist monokular kalibriert, d. h. die Nullposition jedes Auges entspricht der monokularen Fixation eines zentralen Sehreizes.

Klinische Relevanz der subjektiven Fixationsdisparität

Erstaunlicherweise mehrten sich ebenfalls ab den 1980er Jahren in der optometrischen Forschung Hinweise auf die klinische Relevanz der subjektiven Fixationsdisparität. Probanden mit einer stärkeren exo-sFD (in der Nähe mit dem Mallett-Test geprüft) zeigten im statistischen Sinne stärkere asthenopische Beschwerden; Einzelfälle können abweichen. Als Schwellenwert zwischen asymptomatischen und symptomatischen Personengruppen bestimmten T. C. Jenkins et al ein Prisma der Stärke von 1 cm/m, das eine subjektive Fixationsdisparität am Mallett-Test ausgleicht („aligning prism“) [17, 12b].

J. E. Sheedy und J. J. Saladin fanden heraus, dass Personen mit stärkeren asthenopischen Symptomen eher eine steilere prisma-induzierte sFD-Kurve aufwiesen [27]; dies sind solche Personen, die bei zunehmenden Testprismen der Basislage innen bzw. außen (also bei stärkerem Divergieren bzw. Konvergieren) zunehmend größere exo- bzw. eso-sFD-Werte zeigten. Entsprechend fand W. Jaschinski [12], dass sich Personen darin unterscheiden, wie stark die sFD sich mit zunehmender Nähe in Richtung exo verändert. Probanden mit stärkeren Änderungen dieser Art hatten in einer Laborstudie stärkere Sehbeschwerden bei der Bildschirmarbeit, wenn der Abstand zum Monitor gering war und bevorzugten bei freier Einstellung meist einen größeren Sehabstand (bei dem die exo-sFD geringer war).

Varianten des Noniustests sind auch in der Mess- und Korrekturmethode nach H.-J. Haase (MKH) enthalten; ent-

sprechende Prismen waren in der Studie von I. Lie und A. Opheim [21] stabil und reduzierten die Sehbeschwerden. Seit Kurzem wird die unterschiedliche Wirkung von MKH-Prismen auf die subjektive und die objektive Fixationsdisparität untersucht [29, 31]. G. Kommerell et al. verglichen für die sFD dasjenige Ausgleichsprisma, das Probanden selbst so einstellten, dass sie komfortabel sehen können [20, 20b].

Seit etwa 20 Jahren kennt man also die Diskrepanz zwischen klinischer Bedeutung der subjektiven Fixationsdisparität in Bezug auf die Diagnose konvergenzbedingter Sehbeschwerden und der messtechnischen Invalidität im Vergleich zur objektiven Fixationsdisparität. M. Scheimann and B. Wick schrieben dazu: „Given the clinical success that management based on (subjective) fixation disparity measures enjoys, it seems imprudent to discount the clinical research concerning use of (subjective) fixation disparity measures simply because fixation disparity tests measure the sum of separate sensory and motor components rather than simply assessing eye misalignment.“ [30]. Diese Diskrepanz findet man auch in den Lehrbuchartikeln von W. Rüssmann und G. Kommerell sowie von V. Herzau [8, 26].

In der Leseforschung (experimentellen Psychologie) konnten D. Heller und R. Radach mit Hilfe von Eye-Trackern zeigen, dass die beiden Augen im Moment der Fixation nicht auf denselben Buchstaben ausgerichtet waren, sondern dass ein Abstand von 1–3 Buchstaben bestand, der als ein Maß für eine objektive Fixationsdisparität beim Lesen dienen kann [7]. S. P. Liversedge et al. zeigten, dass trotz einer kurzen

Lesefixation von etwa 0,25 Sekunden eine Fusion zustande kommt [22].

Klinisch kann der Vergleich mit klassischen Vergenzmessgrößen interessant sein. So beschrieben S. Jainta et al. individuelle Unterschiede in der Fixationsdisparität beim Lesen, die in gewissem Maße mit der Heterophorie zusammenhängt [11].

Die Messung der Fixationsdisparität beim natürlichen Leseprozess ist eine wesentliche methodische Weiterentwicklung im Forschungslabor, allerdings besteht diese Möglichkeit in der klinischen Diagnostik nicht. Hier ist man auf die Noniusmethode angewiesen, wenn man die Eigenschaften der Fixationsdisparität diagnostizieren will. Daher ist es wichtig zu wissen, welcher quantitative Zusammenhang zwischen subjektiver und objektiver Fixationsdisparität besteht.

Exkurs: Quantitativer Zusammenhang zwischen subjektiver und objektiver Fixationsdisparität

Um den Zusammenhang zwischen diesen beiden Maßen zu beschreiben, wird im Folgenden nicht nur die Größe der Messwerte betrachtet, sondern auch das Quadrat des Korrelationskoeffizienten (r^2) bezogen auf eine Gruppe von Probanden. Das Bestimmtheitsmaß r^2 gibt an, mit welcher Güte sich die sFD aus der oFD vorhersagen lässt und umgekehrt. Bei $r^2 = 1$ besteht ein perfekter Zusammenhang.

Zunächst ist es aufschlussreich, als Ausgangssituation den fusionsfreien Zustand zu betrachten. Eine gute quantitative Übereinstimmung zwischen

subjektiven und objektiven Maßen ergab sich in Forschungsstudien sowohl für die klassische Nah-Heterophorie mit dem Maddox-Test ($r^2 = 0,72$, [4]), als auch für die sogenannte Dunkelvergenz ($r^2 = 0,87$, [13]), bei der weder die Fusion noch die Akkommodation stimuliert wird und in einem dunklen Sehfeld zur subjektiven Vergenzmessung aufblinkende Noniusobjekte verwendet werden. In diesen statischen fusionsfreien Vergenzzuständen (und auch in fusionslosen Zuständen während dynamischer Vergenzsprünge [10]) ähneln sich die Größenordnungen von subjektiven und objektiven Maßen und es besteht ein hohes Bestimmtheitsmaß r^2 .

Ganz anders ist die Situation, wenn eine Fusion bei statischer Vergenz und zentralem Fusionsreiz vorliegt, so wie es beim natürlichen Sehen meist der Fall ist und entsprechend auch in einigen klinischen Testverfahren und Forschungsmethoden [12, 17, 18, 20, 23]. Dann beträgt die Fixationsdisparität subjektiv gemessen im Mittel nur 10% der objektiv gemessenen und r^2 sinkt auf etwa $= 0,5$ [14]. Es kommt noch hinzu, dass diese Korrelation im wesentlichen auf dem Vorzeigen der Fixationsdisparität beruht, weil Eso- wie Exo-Fälle eingeschlossen waren. Eine separate Regression, die lediglich auf einer Richtung der Fixationsdisparität beruht, führt zu noch geringeren r^2 -Werten [31]. Diese Serie von Untersuchungen spricht dafür, dass die Diskrepanz zwischen beiden Varianten der Fixationsdisparität dann besonders groß ist, wenn ein zentraler Fusionsreiz vorliegt. Nach der bisherigen Forschung kann man annehmen, dass die subjektive Fixationsdisparität einen Anteil der objektiven Fixationsdisparität widerspiegelt [15].

Es spricht einiges dafür, dass es einen individuellen sensorischen Mechanismus gibt, der bei einem evtl. vorliegenden motorischen Vergenzfehler zu einer bestimmten subjektiven Fixationsdisparität führt; die Wirkungsweise dieses Mechanismus hängt vermutlich von der räumlichen Struktur des Fusionsreizes und der Noniusobjekte ab (siehe Kasten).

Visuelle Richtung monokularer und binokularer Objekte

Für das Verständnis der Wirkung dichoptischer Noniuslinien könnte es nützlich sein, nicht von der Testsituation in Labor und Klinik auszugehen, sondern von natürlichen Sehsituationen. Denn in einer natürlichen Umgebung hat die evolutionäre Entwicklung des Binokularsystems dazu geführt,

dass alle Sehreize so verarbeitet werden, dass der Mensch eine valide dreidimensionale Repräsentation seiner Umwelt gewinnt und sich darin orientieren und bewegen kann. Dazu gehört sicher nicht die Option, mit dichoptischen Noniuslinien eine Messung von Vergenzfehlerstellungen zu ermöglichen. Zunächst könnte man meinen, dass in der Natur keine Objekte vorkommen, die nur mit einem Auge gesehen werden, weil der Mensch mit zwei Augen sieht. Dennoch gibt es natürliche Situationen, in denen Objekte monokular gesehen werden, wie es z.B. in Abbildung 4 dargestellt ist: Dort wird die blaue Karte gerade so gehalten, dass das linke Auge den unteren Baumstamm nicht sehen kann, während der obere Baumstamm von beiden Augen gesehen wird. Der obere Baumstamm mit der Krone stellt den Fusionsreiz dar. Wenn dabei ein motorischer Vergenzfehler (eine objektive Fixationsdisparität)

besteht, dann werden die disparaten Netzhautprojektionen sensorisch im Panum-Raum fusioniert und beide oberen Stämme erhalten denselben Richtungswert. Dieser normale sensorische Fusionsmechanismus besteht jedoch für den unteren Stamm nicht, weil er im linken Auge nicht abgebildet ist. Dennoch wird der untere Stamm in die Gesamtwahrnehmung integriert, so dass man den Stamm realitätsgetreu durchgehend sieht und nicht mit einem „Noniusversatz“. Solche Situationen kommen in natürlicher Umgebungen häufig vor. Bei einem Waldspaziergang zum Beispiel sieht man vielfältige Verdeckungen durch Äste und Stämme und entsprechende monokulare Bildanteile, die dennoch nicht versetzt erscheinen. Es muss also einen Mechanismus geben, der diese monokularen Bildanteile passend in das Gesamtbild integriert. Es dürfte also bei dieser Betrachtungsweise gar keinen „monoku-

Subjektive FD spiegelt einen Anteil der objektiven FD wider: $sFD = R_i \cdot oFD$

R steht für das englische „ratio“ und der Index i steht für einen individuellen Fall. In dieser Formel repräsentiert oFD die motorische Vergenzstellung und R_i den sensorischen Mechanismus, der zur Wahrnehmung des Noniusversatzes und damit zum Wert für sFD führt. Dies ist jedoch nur scheinbar eine einfache Umrechnungsmöglichkeit, denn der Faktor R_i ist im Einzelfall nicht bekannt.

Der Faktor R_i liegt erwartungsgemäß zwischen 0 und 1, er hängt zunächst von der Art des Fusionsreizes ab und variiert außerdem zwischen Perso-

nen. Es ist eine Forschungsaufgabe, den Faktor R_i aus Messungen der sFD und oFD zu bestimmen und auf diesem Wege die physiologischen Eigenschaften der sensorischen Mechanismen besser zu verstehen. Erstaunlicherweise hatte schon 1985 Remole das Konzept eines quantitativen Verhältnisses (entsprechend R_i) vorgeschlagen [25]: Er ermittelte R_i -Werte von etwa 0,1 bei zentralem Fusionsreiz und konvergenter Prismenbelastung größer als 5 cm/m. Das Konzept von quantitativen sFD -/ oFD -Verhältnissen wurde seitdem

nicht verfolgt, aber kürzlich in einer Studie mit dem Kreuztest bei Variation der Prismenbelastungen angewendet [16]. Für die meisten Probanden lag der Faktor R_i im Bereich zwischen 0 und 0,2 und im Mittel bei etwa 0,1. Dies galt im Bereich von Prismenbelastungen zwischen 2 cm/m Basis-innen und 6 cm/m Basis-außen. Die Probanden unterschieden sich in der Größe dieses Faktors, der mit dem Koeffizienten einer individuellen Regressionsanalyse von sFD versus oFD korrelierte.

laren Noniusversatz“ geben, also keine „subjektive Fixationsdisparität“.

Monokulare Bildanteile durch Verdeckungen in natürlichen Sehsituationen sind seit etwa 20 Jahren ein spezieller Gegenstand im Bereich der Wahrnehmungsforschung [5, 32]. Harris und Wilcox beschreiben in ihrem Review sensorische Mechanismen zur Integration monokularer Bildanteile. Diese werden auch dann entsprechend ihren Gesetzmäßigkeiten wirksam, wenn dichoptische Noniuslinien in Tests

für die subjektive Fixationsdisparität angewendet werden [5]. Leider liefert dieser Gedanke derzeit für das Verständnis der sFD noch keine weitergehende Erklärung. Denn die Forschung zu monokularen Bildanteilen bezog die motorische Vergenz und Fixationsdisparität bisher nicht ein und die Forschung zur Fixationsdisparität berücksichtigte nicht die Rolle monokularer Bildanteile im natürlichen Sehen. Hier besteht also eine Forschungslücke.

Die „unnatürliche“ Besonderheit der dichoptisch dargebotenen Noniuslinien besteht vielleicht nicht darin, dass diese monokular wahrgenommen werden, sondern darin, dass es in direkter Nachbarschaft dieser monokularen Linien/ Bildanteile keine entsprechenden identischen binokularen Bildanteile gibt. Überdies sind die im Test dichoptisch dargebotenen Noniuslinien nicht in einen dreidimensionalen Raum mit Verdeckungen eingebettet. Diese Bedingungen könnten dazu führen, dass man überhaupt einen Noniusversatz wahrnimmt, der dann indirekt vom Vergenzfehler (und evtl. vom Akkommodationsfehler) beeinflusst wird. Hier sei erwähnt, dass sowohl J. Gerling et al. als auch V. Schroth et al. objektive Vergenzmessungen beschreiben, wobei der Fusionsreiz vergleichsweise dichoptische Bildanteile enthält oder nicht [3, 31]. Diese Überlegungen zur Rolle monokularer Bildanteile sind derzeit jedoch lediglich eine Arbeitshypothese für die weitere Forschung.

Diese Sichtweise zugrundegelegt, beschreiben dichoptisch dargebotene Noniuslinien nicht den „normalen“ sensorischen Fusionsprozess disparater, binokular betrachteter Objekte im Panum-Raum, sondern die Integration monokular wahrgenommener Objekte in eine binokular vermittelte Wahrnehmung.

Wenn die subjektive Fixationsdisparität mit Sehbeschwerden korreliert, dann ist derzeit unklar, ob dies an dem Einfluss der motorischen oFD liegt oder an dem Faktor R_p , der die sensorische Verarbeitung repräsentiert. Dazu gibt es bisher keine Studien.

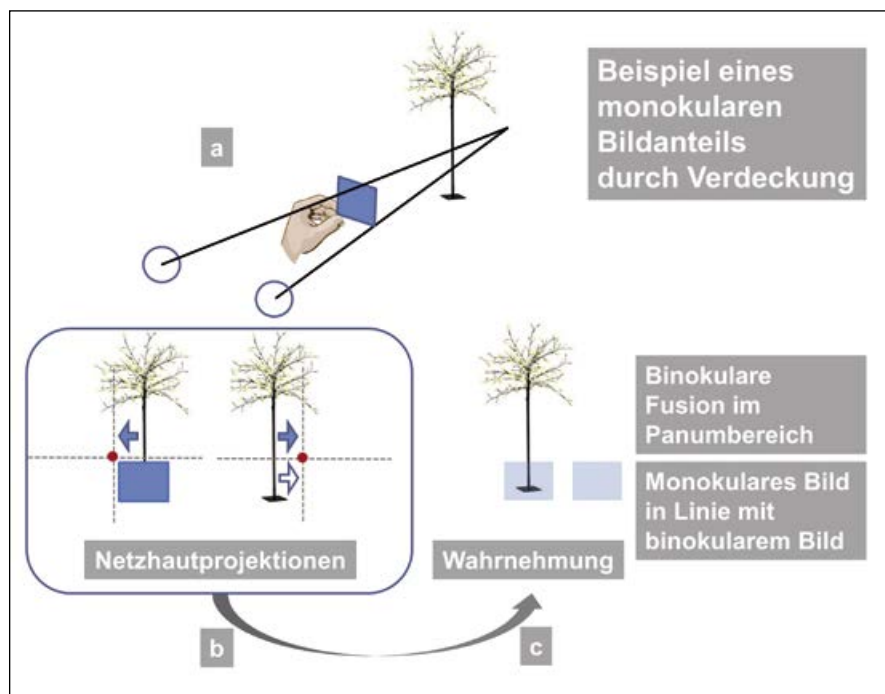


Abbildung 4: Darstellung monokularer Bildanteile im natürlichen Sehen. Die blaue Karte wird so gehalten, dass für das linke Auge der Blick auf den unteren Teil des Stammes verdeckt wird. Der obere Teil des Stammes ist für beide Augen sichtbar und stellt den Fusionsreiz dar (a). Bei einer exo-Fixationsdisparität wird der obere Stamm mit einer Disparität abgebildet, die durch binokulare sensorische Fusion im Panumraum ausgeglichen wird (ausgefüllte blaue Pfeile); es besteht Einfachsehen. Die roten Punkte stellen die Zentren der Foveolae dar, das gestrichelte Kreuz illustriert die horizontalen und vertikalen Netzhautmeridiane. Der monokulare Bildanteil wird so verschoben (offener blauer Pfeil), dass der Stamm trotz Verdeckung durchgehend wahrgenommen wird (b). Bei Fusion des Stammes wird die blaue Karte doppelt gesehen. Vergleiche Abbildung 1 (c).

Fazit

Monokulare Noniuslinien, die getrennt (dichoptisch) den beiden Augen dargeboten werden, sind schon seit mehr als 100 Jahren in der Forschung und in der Klinik zur Messung der „subjektiven Fixationsdisparität“ gebräuchlich. Seit den 1980er Jahren weiß man aus der Vergenzforschung zur „objektiven Fixationsdisparität“ mit Hilfe von Eye-Trackern, dass mit Noniuslinien eine Vergenzfehlerstellung nicht valide gemessen werden kann. Die Stärke

von Sehbeschwerden hängt mit dem Ausmaß der subjektiven Fixationsdisparität zusammen, während entsprechende Studien mit objektiven Messungen bisher fehlen.

Die Diskrepanz zwischen beiden Varianten der Fixationsdisparität ist erst anfänglich geklärt. Mit heute verfügbaren präzisen Video-Eye-Trackern kann es möglich werden, vergleichende Messungen der objektiven Fixationsdisparität in größeren Stichproben durchzuführen, um auch die individuellen Unterschiede systematisch zu

berücksichtigen. Aufschlussreich wären dabei auch Befunde der Wahrnehmungsforschung über monokulare Bildanteile, die im natürlichen Sehen durch Verdeckungen durch voreinander stehende Objekte entstehen können. Wegen der unterschiedlichen physiologischen Bedeutung der beiden Varianten der Fixationsdisparität könnte es zur klaren Unterscheidung nützlich sein, verschiedene Begriffe zu verwenden, z.B. Noniusversatz und Vergenzfehler [28].

LITERATUR

1. *Carter DB (1958)* Studies of fixation disparity. II. Apparatus, procedure and the problem of constant error. *Am J Optom Arch Am Acad Optom* 35: 590–598
2. *Fogt N, Jones R (1998)* Comparison of fixation disparities obtained by objective and subjective methods. *Vision Res* 38: 411–421
3. *Gerling J et al (1998)* Fixationsdisparation am Pola-Zeigertest: nicht repräsentativ für die Augenstellung unter natürlichen Sehbedingungen. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 212: 226–233
4. *Han SJ et al (2010)* Quantification of heterophoria and phoria adaptation using an automated objective system compared to clinical methods. *Ophthalmic Physiol Opt* 30: 95–107
5. *Harris JM, Wilcox LM (2009)* The role of monocularly visible regions in depth and surface perception. *Vision Res* 49: 2666–2685
6. *Hebbard FW (1962)* Comparison of subjective and objective measurements of fixation disparity. *J opti soc am* 52: 706–712
7. *Heller D, Radach R (1998)* Eye movements in reading: Are two eyes better than one? In: *Current oculomotor research: Physiological and psychological aspects.* (Hrsg: Becker W, Deubel H, Mergner T) Plenum Press. New York
8. *Herzau V (2012)* Sensorik des Binokularsehen. In: *Strabismus* (Hrsg: Kaufmann H, Steffen H) S 110–147. Thieme, Stuttgart
9. *Hofmann FB, Bielschowsky A (1900)* Ueber die der Willkür entzogenen Fusionsbewegungen der Augen. *Pflügers Arch ges Physiol* 80: 1–40
10. *Jainta S, Hoormann J, Jaschinski W (2007)* Objective and subjective measures of vergence step responses. *Vision Res* 47: 3238–3246
11. *Jainta S, Jaschinski W (2010)* „Trait“ and „state“ aspects of fixation disparity during reading. *J Eye Mov Res* 3: 1–13
12. *Jaschinski W (2002)* The proximity-fixation-disparity curve and the preferred viewing distance at a visual display as an indicator of near vision fatigue. *Optom Vis Sci* 79: 158–69
- 12 b. *Jaschinski W (2005)* Sehbeschwerden und Aspekte der Fixationsdisparität. *Z prakt Augenheilkd* 26: 282-286
13. *Jaschinski W et al (2007)* Objective versus subjective measurements of dark vergence. *Ophthalmic Physiol Opt* 27: 85–92
14. *Jaschinski W, Jainta S, Kloke WB (2010)* Objective vs subjective measures of fixation disparity for short and long fixation periods. *Ophthalmic Physiol Opt* 30: 379–390
15. *Jaschinski W (2017)* Individual objective and subjective fixation disparity in near vision. *PLOS ONE* e0170190. doi: 10.1371/journal.pone.0170190
16. *Jaschinski W (2018)* Individual objective versus subjective fixation disparity as a function of forced vergence. *PLOS ONE* (erscheint in Kürze)
17. *Jenkins TC, Pickwell LD, Yekta AA (1989)* Criteria for decompensation in binocular vision. *Ophthalmic Physiol Opt* 9: 121–125
18. *Kertesz AE, Lee HJ (1987)* Comparison of simultaneously obtained objective and subjective measurements of fixation disparity. *Am J Optom Physiol Opt* 64: 734–738
19. *Kertesz AE, Lee HJ (1988)* The nature of sensory compensation during fusional response. *Vision Res* 28: 313–322
20. *Kommerell G, Kromeier M, Scharff F, Bach M (2015)* Asthenopia, Associated Phoria, and Self-Selected Prism. *Strabismus* 23: 51–65
- 20 b. *Kommerell G, Bach M (2016)* Prismen bei Heterophorie und Asthenopie. *Z prakt Augenheilkd* 37: 333–341
21. *Lie I, Opheim A (1990)* Long-term stability of prism correction of heterophorics and heterotropics; a 5 year follow-up. Part I: Heterophorics. *J Am Optom Assoc* 61: 491–498
22. *Liversedge SP et al (2006)* Binocular coordination of eye movements during reading. *Vision Res* 46: 2363–2374
23. *Mallett RJF (1974)* The investigation of heterophoria at near and a new fixation disparity technique. *Optician* 148: 547–551
24. *Ogle KN, Martens TG, Dyer JA (1987)* Oculomotor imbalance in binocular vision and fixation disparity. *Lea & Febiger, Philadelphia*
25. *Remole A (1985)* Fixation disparity vs. binocular fixation misalignment. *Am J Optom Physiol Opt* 62: 25–34
26. *Rüssmann W, Kommerell K (2012)* Heterophorie und Asthenopie. In: *Strabismus* (Hrsg: Kaufmann H, Steffen H) S 191–220 Thieme, Stuttgart
27. *Sheedy JE, Saladin JJ (1983)* Validity of diagnostic criteria and case analysis in binocular vision disorders. In: *Vergence Eye Movements: Basic and Clinical Aspects* Hrsg: Schor CM, Ciuffreda KJ) S 517–540, Butterworths, Boston

28. Schmid L, von Handorff C, Jaschinski W (2018) Messungen der Augenbewegungen mit MKH-Prismen, Teil 1: Was messen wir da eigentlich. DOZ 72: 192 – 197
29. Schmid L, von Handorff C, Jaschinski W (2018) Messungen der Augenbewegungen mit MKH-Prismen, Teil 2: Messungen der Vergenzstellung mit und ohne Prismen. DOZ 72: 198 – 205
30. Scheiman M, Wick B (2014) Clinical management of binocular vision: Hetero-

phoric, accommodative and eye movement disorders. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia

31. Schroth V, Joos R, Jaschinski W (2015) Effects of prism eyeglasses on objective and subjective fixation disparity. PLOS ONE e0138871. doi: 10.1371/journal.pone.0138871. eCollection 2015.
32. Zeiner KM, Spitschan M, Harris JM (2014) Perceptual integration across natural monocular regions. J Vis 14: 5

KORRESPONDENZADRESSE:



**Dr.-Ing.
Wolfgang Jaschinski**

Leibniz-Institut für Arbeitsforschung
an der TU Dortmund
Ardeystr. 67, 44139 Dortmund
Jaschinski@ifado.de