

Eberhard Karls Universität Tübingen

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

Fachbereich Biologie

Kognitive Neurowissenschaft

Bachelorarbeit
Kognitionswissenschaft

**Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum–
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes**

Tabea Ellen Victoria Miller

Matrikelnummer

4150406

01.10.2020

Betreuer & Gutachter

Prof. Dr. H. A. Mallot
Kognitive Neurowissenschaft
Universität Tübingen

Tabea Miller

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Bachelorarbeit Kognitionswissenschaft

Eberhard Karls Universität Tübingen

Kognitive Neurowissenschaft

Auf der Morgenstelle 28

72076 Tübingen

Bearbeitungszeitraum: 12.06.2020 - 12.10.2020

Abstract

Im Rahmen des exozentrischen Pointing Paradigmas lieferten Koenderink, van Doorn und Lappin (2000) Evidenz dafür, dass die intrinsische Geometrie des visuellen Raumes von nicht konstanter Krümmung ist. In der vorliegenden Studie wurde zudem untersucht, ob der visuelle Raum symmetrisch ist und ob auch monokulare Tiefenhinweisreize einen Einfluss auf ihn haben. Die Beobachter steuerten einen Pfeil auf der horizontalen Ebene in Richtung eines Targets. Das Experiment wurde mit verschiedenen Beobachter- und Targetpositionen sowie mit zwei Symmetriebedingungen und in einem hellen und einem abgedunkelten Raum durchgeführt. In letzterem waren außer dem beleuchteten Pointer und Target keine monokularen Hinweisreize verfügbar. Wir konnten replizieren, dass der visuelle Raum von nicht-konstanter Krümmung ist. Es wurde eine Kreisbogendarstellung der Geodäten im visuellen Raum vorgeschlagen. Diese wurde mit den Messungen empirischer Horopter (Zajaczkowska, 1956) und den Ergebnissen von Koenderink et al. verglichen. Im Weiteren zeigten wir, dass der visuelle Raum symmetrisch ist und auch von monokularer Hinweisreize beeinflusst wird.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
1. Einleitung	1
2. Methode	8
2.1 Stichprobe	8
2.2 Apparatur und Reize	8
2.3 Versuchsablauf	10
2.4 Versuchsdesign	12
3. Ergebnisse	14
3.1 wahrer Winkel	14
3.2 Symmetrie	16
3.3 Helligkeit	16
3.4 Beobachter	19
3.5 Beobachter- und Targetposition	20
4. Diskussion	23
Literaturverzeichnis	33
Anhang (siehe pdf-Version)	34

Abbildungsverzeichnis

1. Tiefenhinweisreize.....	2
a) binokulare Hinweisreize.	
Quelle: https://www.psychologie.uni-heidelberg.de/ae/allg/lehre/wct/w/w6_raum/w640_binokulare_tk.htm	
Abgerufen: 20.09.2020	
b) Bewegungsparallaxe.	
Quelle: Sczepek, J. (2013). Wahrnehmung des Raumes und seiner Ausdehnung. In J. Sczepek (Hrsg.), Visuelle Wahrnehmung (p. 58). Norderstedt: BoD.	
c) Schattierungsunterschiede.	
Quelle: Mallot, H. A., Skript zur Vorlesung Spacial Cognition. Universität Tübingen	
d) partielle Okklusion.	
Quelle: Mallot, H. A., Skript zur Vorlesung Spacial Cognition. Universität Tübingen	
2. Elliptisch, hyperbolisch und parabolisch.....	3
Quelle: https://thatsmaths.com/2018/12/27/gaussian-curvature-the-theorema-egregium/ Credit:NASA	
Abgerufen: 20.09.2020	
3. Horoptermessungen.....	4
Quelle. Zajackzowska, A. (1956). Experimental test of Luneburg's theory; horopter and alley experiments. <i>Journal of the Optical Society of America</i> , 46(7), 514-527.	
4. Pointingwinkel.....	6
5. Pointer.....	9
6. Aufbau des Versuchsraumes.....	10
7. Schematische Darstellungen der Experimentalbedingungen und -blöcke.....	12
8. Winkelabweichungen aller Durchführungen.....	15
9. Winkelabweichungen und Regressionsparabel.....	15
10. Winkelabweichungen beider Symmetriebedingungen und Regressionsparabeln.....	16
11. Winkelabweichungen beider Helligkeitsbedingungen und Regressionsparabeln.....	17
12. Parameter b der Regressionsparabeln beider Helligkeiten.....	18
13. Winkelabweichungen der hellen Bedingung für verschiedene Beobachterpositionen und Beobachter.....	18
14. Winkelabweichungen der dunklen Bedingung für verschiedene Beobachterpositionen und Beobachter.....	19
15. Winkelabweichungen aller Beobachter und Regressionsparabeln.....	20
16. Parameter a der Regressionsparabeln beider Beobachterpositionen.....	21
17. Winkelabweichungen aller Beobachterpositionen und Regressionsparabeln.....	21
18. Vektordarstellung der Winkelabweichungen.....	22
19. Matrixdarstellung der Winkelabweichungen.....	26

20. Versuchsaufbau der Horoptermessung.....	26
21. Kreisbogen.....	27

Tabellenverzeichnis

1. Parameter der Regressionsparabel.....	22
------------------------------------------	----

Kapitel 1

Einleitung

Während man eine Allee entlangläuft, sieht es so aus, als würden beide Straßenränder in der Ferne zusammenlaufen. Eigentlich sind diese aber parallel zueinander und werden sich im realen Raum niemals berühren. Dies ist ein Beispiel für den Unterschied zwischen dem realen und dem visuellen Raum. Der reale Raum, also die Umgebung, in der wir uns befinden, wird über die Retina abgebildet und in verschiedenen Schritten weiterverarbeitet, sodass wir ein Bild unserer Umgebung sehen: den *visuellen Raum*. Der reale Raum wird über die Retina nur zweidimensional abgebildet. Um die dritte Dimension, also die Tiefendimension, abzubilden, benutzt das Gehirn binokulare Unterschiede, Bewegungsparallaxe und andere monokulare Hinweisreize. Im Folgenden wird näher auf die verschiedenen Hinweisreize eingegangen.

Binokulare Hinweisreize sind auf die retinale Disparität zurückzuführen: Der Augenabstand von etwa sechs cm erzeugt verschobene Bilder, die im Gehirn verglichen werden. Somit kann die Entfernung von Objekten berechnet werden. Wird ein Punkt fixiert, so liegen weitere Punkte, deren Retinaabbildungen korrespondieren, auf dem Vieth-Müller-Kreis (siehe Abbildung 1a), der auch als theoretischer Horopter bezeichnet wird. Der theoretische Horopter unterscheidet sich von dem empirisch beobachtbaren Horopter (siehe Abbildung 1a). Auf letzterem liegen alle Punkte, die mit einer Tiefendisparität von Null wahrgenommen werden.

Des Weiteren geben Bewegungsparallaxe (siehe Abbildung 1b) Rückschluss auf die Tiefe von Objekten: Bei Bewegung der Augen verschieben sich retinale Bildpunkte von unterschiedlich weit entfernten Objekten mit verschiedener Winkelgeschwindigkeit. Letztere bezeichnet den Weg, den das Abbild auf der Retina zurücklegt, wenn sich die Augen bewegen. Ist ein Objekt weit entfernt vom Beobachter, so ist die Winkelgeschwindigkeit der korrespondierenden Punkte relativ klein und vice versa. Schließlich geben weitere

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

monokulare Tiefenhinweisreize wie beispielsweise Schattierungsunterschiede (Abbildung 1c) oder die partielle Okklusion (Abbildung 1d) Hinweise auf die Tiefe von Objekten.

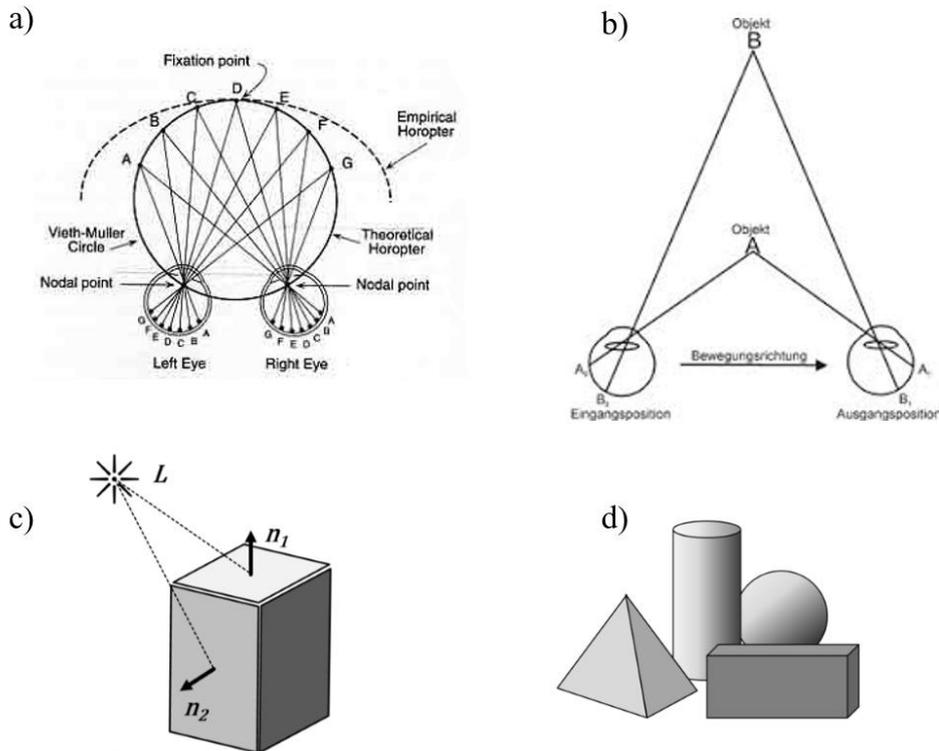


Abbildung 1. Tiefenhinweisreize. a) binokulare Hinweisreize. Der Augenabstand führt zu einer Disparität der Retinapositionen eines Objektes; bei nahen Objekten ist diese Disparität größer als bei weit entfernten. Wird ein Punkt (hier D) fixiert, so liegen alle gleich weit entfernten Objekte auf dem Vieth-Müller-Kreis (theoretischer Horopter). Alle Punkte, die man in der gleichen Tiefe sieht, liegen auf dem empirischen Horopter. b) Bewegungsparallaxe. Bei Bewegung der Augen verschiebt sich der retinale Bildpunkt von nahen Objekten (hier Objekt A) weiter als von weit entfernten Objekten (hier Objekt B). c) Schattierungsunterschiede. Verschiedene Schattierungen geben Aufschluss auf die Tiefe von Objekten. d) partielle Okklusion. Sind Objekte teilweise von anderen Objekten verdeckt, liefert dies Informationen über die respektive Tiefe der Objekte.

Quelle: a) https://www.psychologie.uni-heidelberg.de/ae/allg/lehre/wct/w/w6_raum/w640_binokulare_tk.htm. b) Sczepek, 2013, S. 58. c) Mallot, Vorlesungsskript. d) Mallot, Vorlesungsskript.

Da die dritte Dimension (Tiefendimension) also aus Interpretationen und binokularen Übereinstimmungen berechnet wird, stellt sich die Frage, ob sich die Geometrie des visuellen Raumes von der des realen Raumes unterscheidet. Dies wird von der Literatur angenommen: Tatsächlich gibt es einen Konsens, dass die Geometrie des visuellen Raumes nicht euklidisch ist (Erlelens, 2015; Foley, 1972; Foley, Ribeiro-Filho et al., 2004). Dies ist recht offensichtlich, da das Parallelenaxiom im visuellen Raum nicht gilt: Betrachtet man wie im obengenannten Beispiel eine Allee mit theoretisch parallelen Geraden, so wirkt es

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

auf einen, als würden diese in der Ferne aufeinander zulaufen. Abgesehen von der Einstimmung, dass der visuelle Raum nicht euklidisch ist, ist über deren Geometrie momentan noch einiges unbekannt.

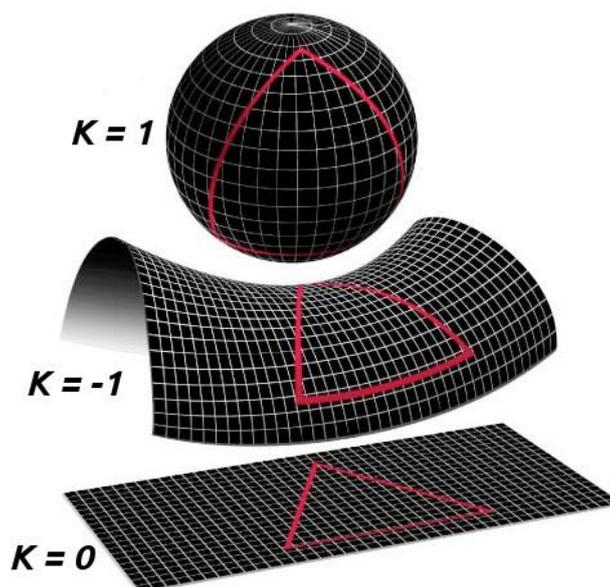


Abbildung 2. Im *elliptischen* Raum beträgt die Winkelsumme eines Dreiecks über 180 Grad und die Krümmung (K) ist positiv. Im *hyperbolischen* Raum beträgt die Winkelsumme eines Dreiecks unter 180 Grad und die Krümmung ist negativ. Im *parabolischen* Raum beträgt die Winkelsumme eines Dreiecks genau 180 Grad und die Krümmung ist Null.

Quelle: <https://thatsmaths.com/2018/12/27/gaussian-curvature-the-theorema-egregium/> Credit: NASA

Die erste fundierte Theorie bezüglich der Geometrie des visuellen Raumes entwarf Luneburg (1947), laut welcher der Autor nicht nur annimmt, dass der visuelle Raum eine Riemannsche Mannigfaltigkeit darstelle, sondern auch, dass diese von konstanter Krümmung sei. In einer Riemannschen Mannigfaltigkeit können Geodäten, welche die kürzesten Strecken zwischen zwei unterschiedlichen Punkten sind, gekrümmte Kurven sein. Dies führt dazu, dass die Winkelsumme eines Dreiecks im Riemannschen Raum auch über (bei positiver Krümmung) und unter (bei negativer Krümmung) 180 Grad betragen kann. Die Krümmung kann durch die *intrinsische Geometrie* beschrieben werden (theorema egregium, Gauß, 1828). Abbildung 2 zeigt, dass die intrinsische Geometrie für den elliptischen Raum von positiver Krümmung ist, für den hyperbolischen von negativer und im parabolischen ohne Krümmung. Gauß nutze die Eigenschaft des Winkelüberschusses, um die Krümmung der Erde zu messen. Da die Erde elliptisch, also positiv gekrümmt ist, beträgt die Winkelsumme eines Dreiecks auf der Erde über 180 Grad. Sollte Luneburgs Annahme einer nichteuklidischen, Riemannschen Geometrie konstanter Krümmung

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

stimmen, so könnte diese entweder elliptisch, das heißt von positiver Krümmung, oder hyperbolisch, also von negativer Krümmung, sein. Luneburg nimmt eine konstante negative Krümmung an und stellt somit die Theorie eines hyperbolischen visuellen Raumes vor.

In eine andere Richtung deuten jedoch die Resultate von Zajaczkowska (1956), die in ihrem Experiment empirische Horopter, also alle Bildpunkte, die in der gleichen Tiefe bezüglich eines Fixierpunktes gesehen werden, maß. Die empirischen Horopter wurden mit verschiedenen Distanzen zum Beobachter gemessen, wobei sich ergab, dass die empirisch beobachteten Horopter in der Nähe positiv und weiter entfernt negativ gekrümmt waren (siehe Abbildung 3). Dies widerspricht der Theorie einer konstanten Krümmung.

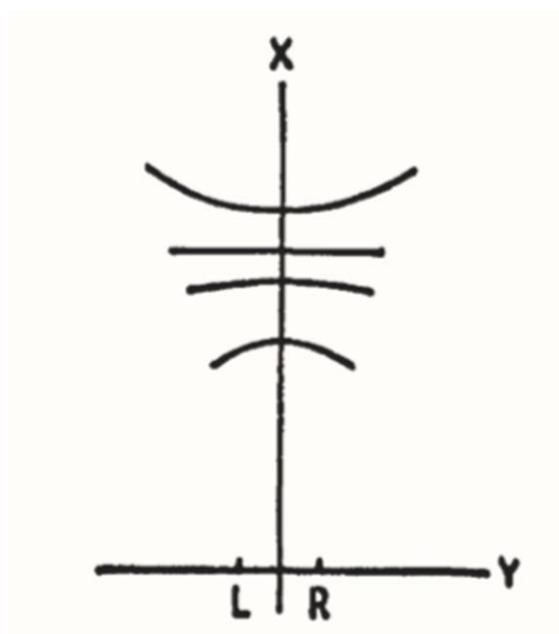


Abbildung 3. Horoptermessungen. Die empirischen Horopter sind in der Nähe positiv und in der Ferne negativ gekrümmt.
Quelle: Zajaczkowska, 1956

Auch Koenderink, van Doorn und Lappin (2000) stellten die Hypothese der konstanten Krümmung, beziehungsweise des hyperbolischen visuellen Raumes in Frage. Im Gegensatz zu den vorherigen Experimenten zur Geometrie des visuellen Raumes, im Rahmen derer meist nur ein paar Lichtpunkte in einem sonst dunklen Raum sichtbar waren, führten Koenderink et al. (2000) ihr Experiment unter vergleichsweise natürlichen Bedingungen durch: Das Experiment fand auf einer hochgewachsenen Wiese mit wahrnehmbarem Horizont statt. Neben den vermehrt verfügbaren visuellen Hinweisreizen waren auch Oberkörperbewegungen der Beobachter erlaubt. Für ihre Studie entwickelten sie ein neues experimentelles Paradigma, das *exozentrische Pointing*. Beim exozentrischen

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Pointing gibt es einen Pointer, also einen bewegbaren Zeiger auf einem Stativ, welcher auf der horizontalen Ebene in Richtung eines Targets gesteuert werden soll. Der springende Punkt hierbei ist, dass der Beobachter nicht hinter dem Pointer steht und somit auf das Target zielen kann (das wäre egozentrisches Pointing). Da der Beobachter nicht hinter dem Pointer steht, steuert er den Zeiger des Pointers über eine Fernbedienung. Die Autoren instruierten die Beobachter, den Zeiger so zu steuern, dass sie den Eindruck hatten, er würde auf das Target zeigen. Die Beobachter begingen systematische Fehler, die als Winkelabweichungen gemessen wurden. Aus den Ergebnissen schlussfolgerten Koenderink et al., dass der visuelle Raum tatsächlich nicht von konstanter Krümmung ist: Waren Pointer und Target nah, so war die Krümmung positiv (elliptisch); waren sie weit vom Beobachter entfernt, so war diese negativ (hyperbolisch).

In Bezug auf die oben genannten bestehenden Befunde ergeben sich nennenswerte Wissenslücken: Neben der noch immer ungeklärten Frage darüber, wie genau die Krümmung des visuellen Raumes aussieht, wollen wir zusätzlich noch einen Schritt zurück gehen: Luneburg (1947) und Koenderink et al. (2000) gingen von einem symmetrischen Riemannschen visuellen Raum aus, ohne dass dies bereits getestet wurde. In der vorliegenden Studie werden wir den visuellen Raum auf Links-Rechts-Symmetrie prüfen. Ferner ist in der Literatur eine Inkonsistenz hinsichtlich visueller Hinweisreize auszumachen: Koenderink et al. (2000) führten ihr Experiment unter natürlichen Bedingungen mit vielen monokularen Hinweisreizen durch, wohingegen die meisten anderen den Beobachtern kaum monokulare Hinweisreize zur Verfügung stellten; vielmehr wurden nur einzelne Lichtpunkte im sonst dunklen Raum gezeigt (Blank 1953; Indow & Watanabe, 1988). Der direkte Einfluss der Verfügbarkeit von monokularen Hinweisreizen auf die intrinsische Geometrie des visuellen Raumes wurde jedoch noch nicht analysiert.

Um sich mit diesen Unklarheiten zu beschaffen, untersuchte die vorliegende Studie die intrinsische Geometrie des visuellen Raumes. Hierbei wurde lediglich der visuelle Raum auf der horizontalen Ebene auf Augenhöhe untersucht. Der Fokus wurde auf die Fragen gelegt, ob die Krümmung des visuellen Raumes a) symmetrisch, b) konstant und c) von monokularen Tiefenhinweisreizen beeinflusst ist. Dazu wurde das exozentrische Pointing Paradigma angewendet, was auch schon Koenderink et al. (2000) einsetzten. Als abhängige Variable (AV) maßen wir die Winkelabweichung der Zeigereinstellungen (siehe Abbildung 4). Als unabhängige Variablen (UV) wurden die Positionen der Targets und des Beobachters bezüglich ihrer Abstände zum Pointer manipuliert. Somit variierte auch der Winkel am

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Pointer, welcher von Beobachter und Target eingeschlossen wird (veranschaulicht in Abbildung 4), der im Folgenden als *wahrer Winkel* bezeichnet werden wird. Der wahre Winkel impliziert also die verschiedenen Beobachter- und Targetpositionen. Andererseits wurde die Symmetrie (Pointer links vom Beobachter und Targets rechts versus Pointer rechts und Targets links) als UV gemessen. Schließlich wurde die Verfügbarkeit von monokularen Hinweisreizen manipuliert, sodass in einer Bedingung der gesamte Raum sichtbar war (heller Raum), während in der Anderen allein Pointer und Target zu erkennen waren (dunkler Raum).

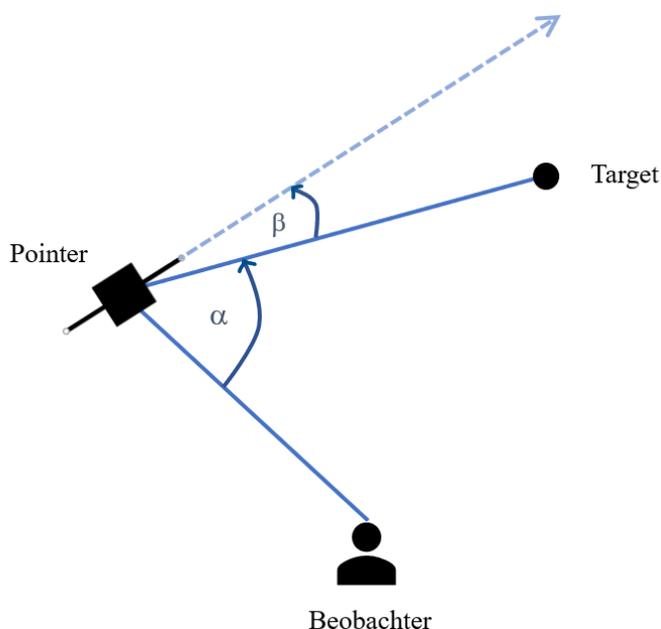


Abbildung 4. Pointingwinkel. Wir bezeichneten den Winkel α (Winkel am Pointer, welcher von Beobachter und Target eingeschlossen wird) als *wahrer Winkel* und den Winkel β (Winkelüber- oder -unterschuss der Zeigereinstellungen) als *Winkelabweichung*.

Die Ergebnisse von Koenderink et al. (2000) und die Horoptermessungen von Zajaczkowska (1956) lassen darauf schließen, dass der visuelle Raum entgegen der Theorie von Luneburg (1947) nicht von konstanter Krümmung ist. Also erwarteten wir, dass die Winkelabweichungen mit den verschiedenen wahren Winkeln variieren würden. Da wir für die Manipulation des wahren Winkels die Target- und Beobachterpositionen variierten, wurde auch deren Effekt auf die Winkelabweichung getestet. Es wurde eine Interaktion der Beobachter- und Targetpositionen erwartet, da Koenderink et al. (2000) einen Einfluss des Abstandes zwischen Beobachter und Target auf die Winkelabweichungen fanden. Des

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Weiteren gingen wir aufgrund fehlender Hinweise entgegen dieser Hypothese von einem symmetrischen visuellen Raum aus. Sollte der visuelle Raum jedoch nicht symmetrisch sein, so würde sich dies statistisch durch eine Interaktion der Faktoren „Symmetrie“ und „wahrer Winkel“ zeigen. Schließlich erwarteten wir, dass die Helligkeit des Raumes die Pointings beeinflusst, da neben binokularen auch monokulare Hinweisreize essenziell für die Tiefenwahrnehmung sind. Auch gehen wir davon aus, dass die Ergebnisse im dunklen Raum symmetrischer sind als im hellen, da monokulare Informationen womöglich auch als asymmetrische Störreize fungieren können. Dies würde sich durch eine Interaktion der Faktoren „Helligkeit“ und „Symmetrie“ zeigen, wobei die Pointings in der dunklen Bedingung symmetrischer wären.

Kapitel 2

Methode

2.1 Stichprobe

An dem Versuch nahmen vier Probanden im Alter von 20 bis 81 Jahren ($M = 35.75$ Jahre, $SD = 30.17$ Jahre) teil. Davon war einer männlich und drei rechtshändig. Alle Beobachter hatten eine normale oder korrigierte Sehstärke und stereoskopisches Sehvermögen. Das Experiment fand im Rahmen einer Bachelorarbeit statt. Als Vergütung bestand das Angebot von Versuchspersonenstunden.

2.2 Apparatur und Reize

Das Experiment wurde in einem geschlossenen Innenraum, der 6 m breit und 8.4 m lang war, durchgeführt. In der hellen Versuchsbedingung war der Raum erleuchtet und gut erkennbar, wohingegen er in der dunklen Bedingung abgedunkelt war, sodass der Raum sowie seine Geometrie nicht zu erkennen waren. Der Aufbau des Experimentalraumes ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Tiefe des Raumes war gedanklich unterteilt in 6 Abschnitte (Position 0 bis 5). Je nach Symmetrieblock stand entweder auf der linken oder rechten Seite des Raumes an Position 3 ein Pointer. Auf der gegenüberliegenden Seite waren insgesamt fünf Targets an Position 1 bis 5 aufgestellt. Als Targets wurden LEDs verwendet, die auf Stative aufgestellt waren (für eine detaillierte Schaltung der LEDs vergleiche Anhang a). Der Beobachter saß in der Mitte des Raumes auf einem Drehstuhl. Dabei befand sich der Drehstuhl je nach Experimentalblock auf Position 0, 1 oder 2, wodurch der Abstand von dem Beobachter zum Pointer variierte.

Als Pointer wurde ein Würfel mit einer Seitenlänge von 20 cm angefertigt, durch dessen Mitte ein 1 m langer und 1.5 cm breiter Holzstab gesteckt wurde, der als Zeiger diente. Der Zeiger trat an beiden Seiten 40 cm hervor. Die Seiten des Würfels waren mit

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Mattpapier überzogen. In der dunklen Bedingung konnten so zwei kleine Lämpchen in die Mitte des Würfels gesetzt werden, welche von innen das Mattpapier beleuchteten. Auf diese Weise war die Geometrie des Würfels auch in der dunklen Bedingung sichtbar, ohne dass der Rest des Raumes merklich beschienen wurde. Zusätzlich wurden in der dunklen Bedingung kleine LEDs am Pfeil befestigt, sodass dieser sichtbar war. Für detaillierte Stromkreise vergleiche Anhang a. Der Würfel war mit Hilfe eines Drehgelenkes auf ein Stativ befestigt, sodass sich der Zeiger auf Augenhöhe der Versuchsperson befand. Es wurde ein Standard Drehgelenk der Marke Edelkrone verwendet. Dieses ermöglichte Drehungen des Pointers auf der horizontalen Ebene. Die Beobachter konnte diese Drehungen über eine Fernbedienung steuern. Als Fernbedienung wurde die Smartphone-App „Edelkrone“ verwendet, welche leicht zu bedienen war. Unter dem Zeiger war eine Logitech-Kamera angebracht. Den Pointer kann man in Abbildung 5 sehen. Pointer und Targets wurden alle auf Augenhöhe des Beobachters positioniert.

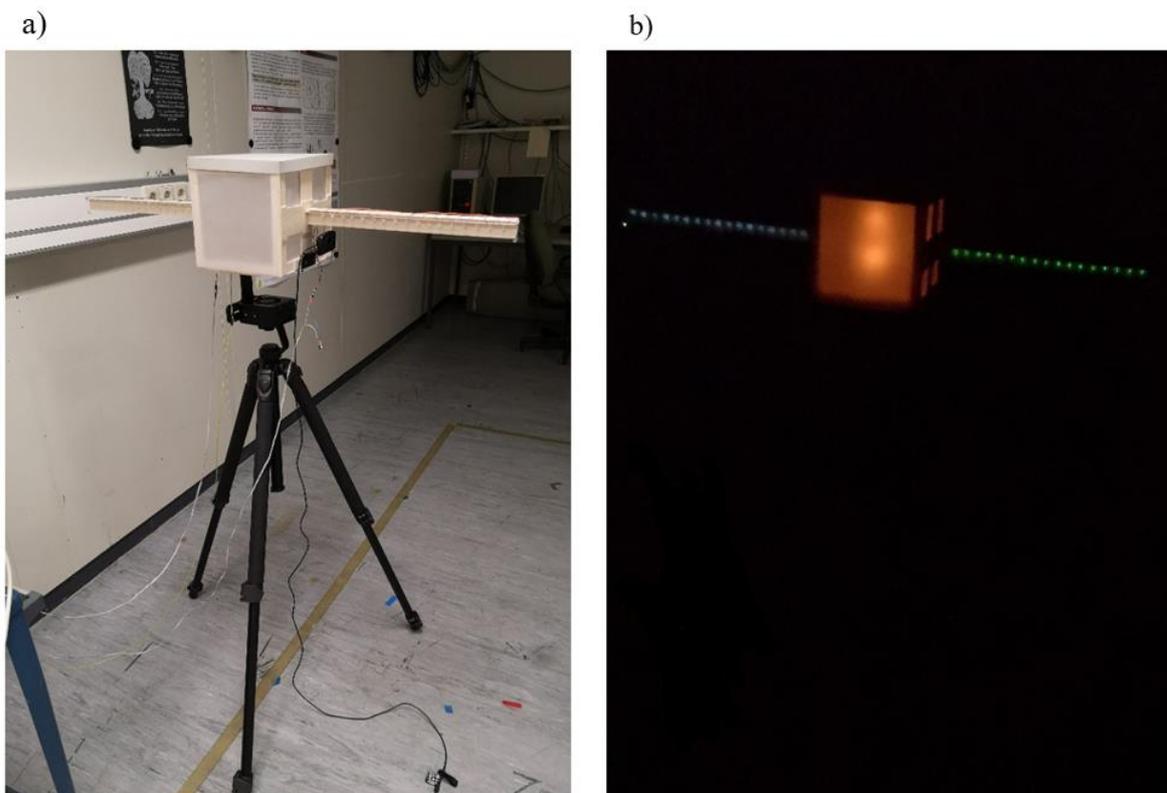


Abbildung 5. Der Pointer bestand aus einem Stativ, einem Würfel und einem Holzstab, der als Zeiger fungierte. a) Pointer im hellen Raum. b) Pointer im dunklen Raum. Es waren der von innen beleuchtete Würfel und der beleuchtete Zeiger zu sehen.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

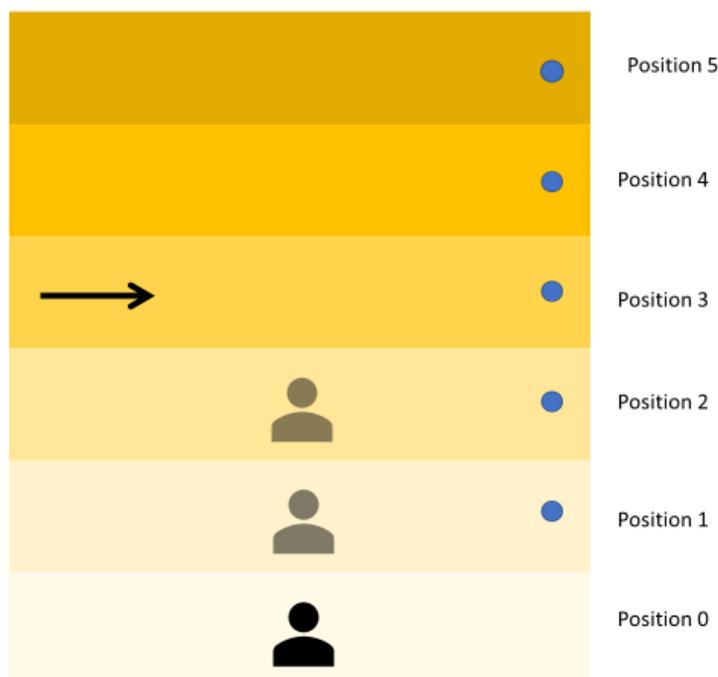


Abbildung 6. Aufbau des Versuchsraumes. Der Versuchsraum war in sechs Bereiche unterteilt: 0 bis 5. Auf Position 1 bis 5 stand jeweils ein Target (●). Der Pointer (→) stand auf Position 3. In der Hälfte der Durchgänge war der Pointer auf der linken Raumseite und die Targets auf der rechten und vice versa. Der Beobachter (☾) saß auf einem Drehstuhl, der in je einem der drei Experimentalblöcke auf Position 0, 1 oder 2 stand.

2.3 Versuchsablauf

In jedem Experimentaldurchgang saß der Beobachter auf einem Drehstuhl. Der Beobachter durfte den Stuhl und seinen Kopf drehen, sich aber nicht anderweitig fortbewegen. In der dunklen Bedingung leuchtete ein Target auf der gegenüberliegenden Raumseite des Pointers auf. In der hellen Bedingung waren alle fünf Targets sichtbar und der Versuchsleiter teilte dem Beobachter mit, welches der Targets er ansteuern sollte. Mit einer Fernbedienung über ein Smartphone steuerte der Beobachter den Zeiger des Pointers. Dieser drehte sich dementsprechend auf einer horizontalen Ebene. Der Beobachter drehte den Zeiger solange, bis er dachte, dass der Zeiger auf das Target zeigt. Der Beobachter teilte dem Versuchsleiter mit, wenn er fertig war. Der Versuchsleiter nahm dann über einen Laptop, der mit der Kamera unter dem Zeiger verbunden war, ein Foto auf. Aus diesen Fotos konnten im Nachhinein die Winkelabweichung gemessen werden. In der dunklen Bedingung schaute der Beobachter zudem vermehrt auf den Bildschirm des Smartphones (die Bildschirmhelligkeit betrug konstant 25%), damit er nicht dunkeladaptierte.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Das Experiment bestand aus zwei wesentlichen Versuchsbedingungen, die in zwei verschiedenen Experimentalsitzungen durchgeführt wurden. In der ersten Sitzung wurde die helle Bedingung getestet: Der Experimentalraum war erleuchtet und somit gut sichtbar. Dahingegen waren in der dunklen Bedingung lediglich der Zeiger und ein Target sichtbar, während der restliche Raum dunkel und unerkennbar blieb. Die beiden Experimentalsitzungen fanden im Abstand von mindestens zwei Wochen statt, damit die Probanden die Raumstruktur in der dunklen Bedingung nicht mehr verinnerlicht hatten. Eine Experimentalsitzung dauerte ca. 45 - 60 Minuten. Zu Beginn wurden die Probanden begrüßt und wurden mit Hilfe eines Stereoskops und Doppelbildern erfolgreich auf die Fähigkeit zum Stereosehen getestet. Anschließend bekamen sie Instruktionen zu dem Experiment: Sie sollten den Zeiger mit einer Fernbedienung so steuern, dass er möglichst genau auf das Target zeigt. In der hellen Versuchsbedingung, bei der alle Targets sichtbar waren, wurde dem Beobachter vom Versuchsleiter gesagt, auf welches der fünf Targets der Zeiger zeigen sollte. In der dunklen Bedingung leuchtete immer nur das Target auf, auf welches der Beobachter zeigen sollte. Zudem wurde der Beobachter hier instruiert, regelmäßig auf den hellen Smartphone-Bildschirm zu schauen, damit er nicht dunkeladaptierte. Während des Experimentes saß der Beobachter auf einem Drehstuhl und durfte den Stuhl und seinen Kopf drehen, aber sich nicht anderweitig fortbewegen. Jede Experimentalsitzung bestand aus zwei Symmetrieblocken, die über die Beobachter ausbalanciert wurden: In einem Block stand der Pointer auf der linken Seite des Raumes und die Targets auf der rechten und vice versa. So konnte auf Links-Rechts-Symmetrie geprüft werden. Pro Symmetrieblock durchliefen die Beobachter drei Experimentalblöcke, bei denen sie jeweils auf einem Drehstuhl an Position 0, 1 oder 2 saßen. Die Hälfte der Probanden saß erst auf Position 0, dann auf Position 1 und schließlich auf Position 2. Die andere Hälfte durchlief die Positionen in umgekehrter Reihenfolge. So wurde getestet, ob der Abstand zum Pointer einen Einfluss auf die gemessenen Winkelabweichungen hatte.

Zwischen den Experimentalblöcken wurde eine kurze Pause eingelegt. Damit die Beobachter nicht dunkeladaptierten, wurde der Raum in den Pausen hell erleuchtet. In jeder der drei Experimentalblöcke steuerte der Beobachter jedes der fünf Targets je vier Mal an. Die Reihenfolge wurde randomisiert; jedoch wurde sichergestellt, dass mindestens zwei andere Targets angesteuert werden, bis das erste erneut angesteuert wurde. Zudem wurde darauf geachtet, dass nicht zu viele benachbarte Targets nacheinander angesteuert wurden

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

und dass die Targets nicht allzu unterschiedlich verteilt waren.¹ Die verschiedenen Bedingungen und Experimentalblöcke, welche die Beobachter durchliefen, sind schematisch in Abbildung 7 zu sehen. Insgesamt durchliefen die Probanden 240 Durchgänge². Zu keinem Zeitpunkt wurden die Probanden informiert, ob ihre Zeigereinstellungen exakt waren.

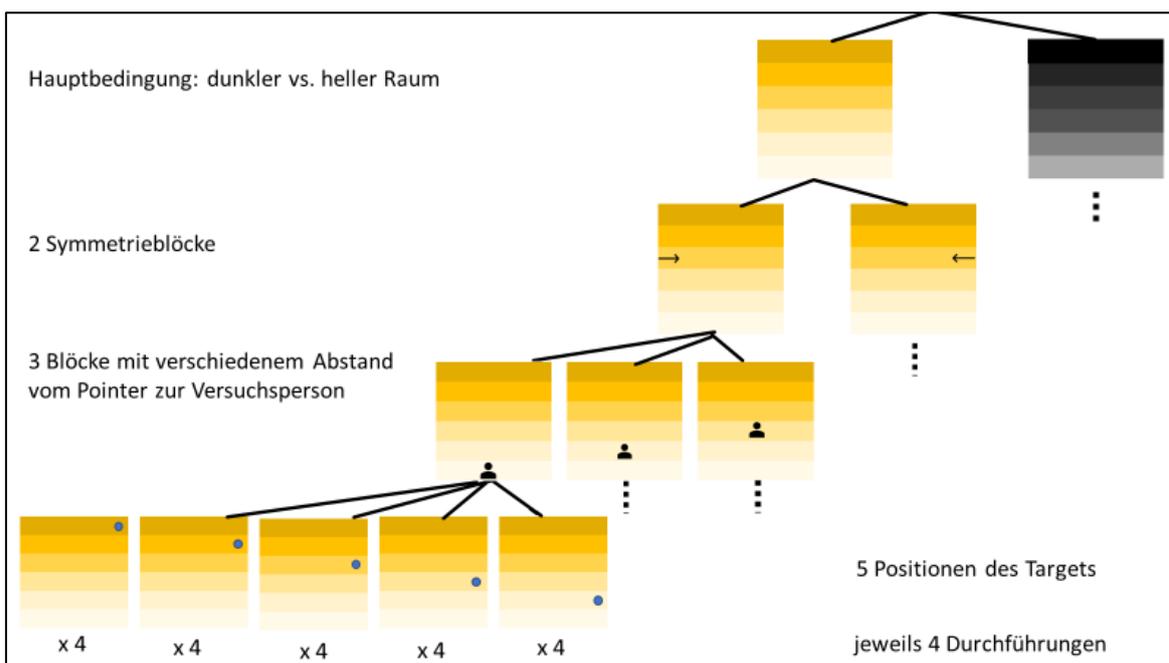


Abbildung 7. Schematische Darstellungen der Experimentalbedingungen und -blöcke. Die Beobachter durchliefen insgesamt 240 Durchgänge. Es gab zwei Experimentalsitzungen, in denen die Hauptbedingung der Sichtbarkeit des Raumes getestet wurde. In einer Experimentalsitzung war der Raum hell, in der anderen dunkel. Pro Sitzung wurden zwei Symmetrieblocke und pro Symmetrieblock drei Blöcke mit verschiedenem Abstand vom Pointer zur Versuchsperson getestet. Pro Block wurden die fünf Targets je vier Mal angepeilt.

2.4 Versuchsdesign

Der Versuchsplan entsprach einem Messwiederholungsdesign. Als UV wurden Beobachter- und Targetposition, Helligkeit und Symmetrie manipuliert. Es gab drei Beobachterpositionen (0, 1 & 2) und fünf Targetpositionen (1, 2, 3, 4 & 5). Daraus ergaben sich 15 verschiedene wahre Winkel. Die Helligkeit war entweder hell oder dunkel. In der hellen Bedingung war der Raum sichtbar, in der dunklen Bedingung waren nur Zeiger und

¹ Reihenfolge: Target 1, 3, 4, 2, 3, 5, 1, 3, 5, 4, 1, 2, 4, 5, 3, 2, 4, 5, 1, 2.

² 2 (hell vs. dunkel) x 2 (Symmetrie) x 3 (Beobachterposition) x 5 (Targetposition) x 4 (jedes Target vier Mal) = 240.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Targets sichtbar, da der restliche Raum zu dunkel war. Es gab zwei Symmetriebedingungen: Entweder stand der Pointer links und die Targets rechts (Symmetrie 1) oder umgekehrt (Symmetrie 2). Als AV wurden die Winkelabweichungen gemessen.

Kapitel 3

Ergebnisse

Über die Bilder, welche nach jedem Durchgang durch die Kamera unter dem Zeiger aufgenommen wurden, konnte die Winkelabweichung berechnet wurde. Auf der Bildbreite konnten nur Winkel bis betragsmäßig ca. 33 Grad abgebildet werden. Durchgänge mit betragsmäßig größerer Winkelabweichung (0.31%) wurden dementsprechend auf ungefähr +/- 33 Grad gestellt. Es wurden keine Durchgänge ausgeschlossen. Die Analyse der Daten wurde mit dem Programm Matlab durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der auf dem Signifikanzniveau von $\alpha = .01$ durchgeführten Varianzanalyse (ANOVA) mit den Faktoren „wahrer Winkel“, „Symmetrie“, „Helligkeit“ und „Beobachter“ auf die Winkelabweichung (Winkel in Grad angegeben) aufgezeigt. Der Faktor „wahrer Winkel“ wurde als kontinuierliche Variable gerechnet. Für die Vergleichbarkeit der Symmetriebedingungen wurden die Winkelabweichungen für die zweite Symmetriebedingung (Pointer rechts, Targets links) hierfür an der Nullstelle Punktgespiegelt (siehe Abbildung 10). Dementsprechend entspricht der Faktor „wahrer Winkel“ also dem betragsmäßigen wahren Winkel.

3.1 wahrer Winkel

Die Varianzanalyse zeigte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors „wahrer Winkel“, $F(1) = 582.73$, $p < .001$. In Abbildung 8 sind die Winkelabweichungen in Abhängigkeit des wahren Winkels abgebildet. Man erkennt systematische Winkelabweichungen mit einem klaren Muster, welches sich bei allen Beobachtern wiederholt. Daher wurde eine Regressionsparabel dritten Grades ($P = ax^3 + bx^2 + cx$) berechnet, welche das Muster widerspiegelt (siehe Abbildung 9). In Tabelle 1 sind die

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

berechneten Werte der Koeffizienten a , b und c einzusehen. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Parameter zu gewährleisten, wurde für die Winkeleinheit hier Bogenmaß gewählt. An allen anderen Stellen in dieser Studie werden Winkel in Grad angegeben.

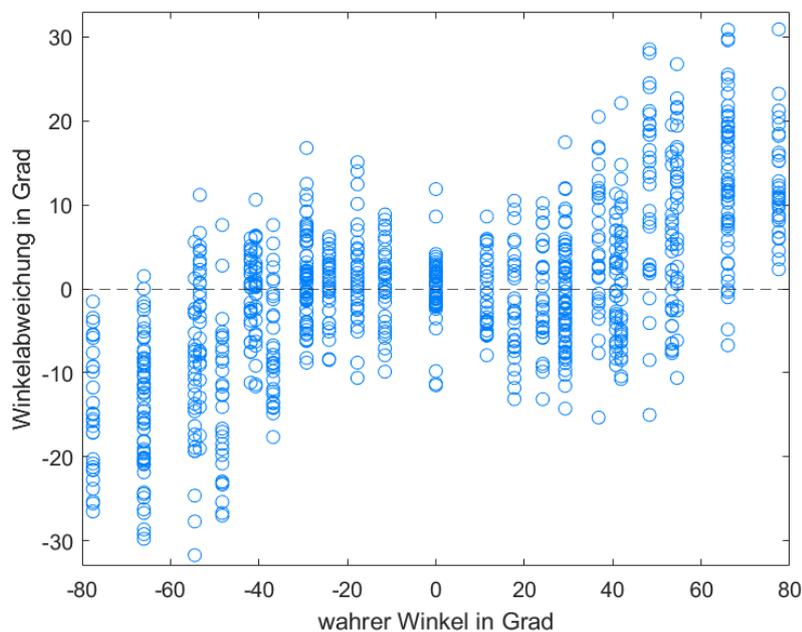


Abbildung 8. Winkelabweichungen aller Durchführungen in Abhängigkeit des wahren Winkels.

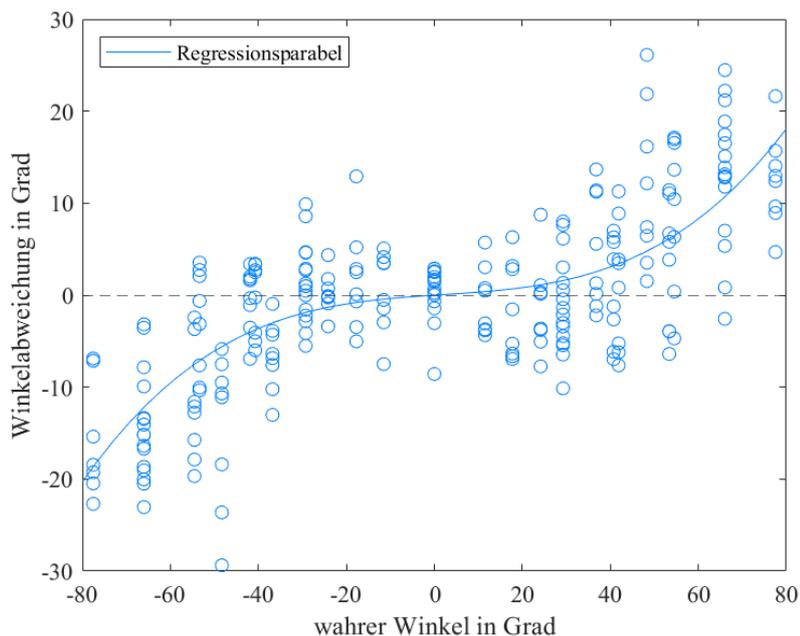


Abbildung 9. Mittlere Winkelabweichungen in Abhängigkeit des wahren Winkels und angenäherte Regressionsparabel.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

3.2 Symmetrie

Es zeigte sich weder ein Haupteffekt der Symmetriebedingung auf die gespiegelte Winkelabweichung, $F(1) = 0.31$, $p = .575$, noch ein Interaktionseffekt der Symmetriebedingung mit dem wahren Winkel, $F(1) = 2.16$, $p = .142$. Auch graphisch wirken die Daten äußerst symmetrisch: In Abbildung 10 sind die Winkelabweichungen für beide Symmetriebedingungen sowie deren angenäherte Parabeln dargestellt.

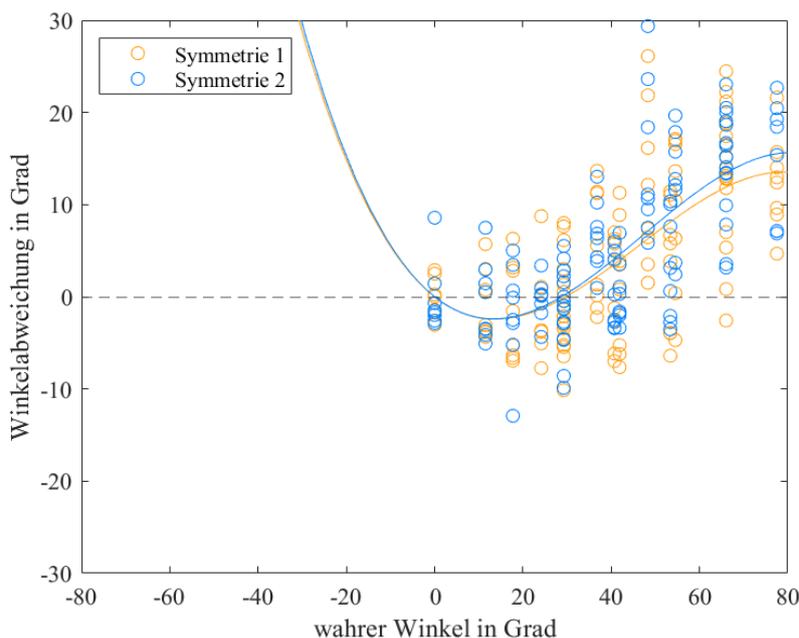


Abbildung 10. Mittlere Winkelabweichungen beider Symmetriebedingungen (Pointer links und Targets rechts versus Pointer rechts und Targets links) in Abhängigkeit des wahren Winkels sowie deren Regressionsparabeln. Für die Vergleichbarkeit wurden die Winkel der zweiten Symmetriebedingung gespiegelt.

3.3 Helligkeit

Des Weiteren zeigte die Varianzanalyse einen signifikanten Haupteffekt des Faktors „Helligkeit“, $F(1) = 13.11$, $p < .001$: In der dunklen Bedingung waren die Winkelabweichungen größer ($M = 7.55$ Grad, $SD = 4.92$ Grad) als in der hellen ($M = 1.79$ Grad, $SD = 3.28$ Grad). In Abbildung 11 sind die Regressionsparabeln der Winkelabweichungen in der hellen und dunklen Bedingung vergleichend abgebildet. Zudem zeigte sich ein signifikanter Interaktionseffekt der Faktoren „Helligkeit“ mit „wahrer Winkel“, $F(1) = 9.25$, $p = .002$ und ein signifikanter Interaktionseffekt der Helligkeitsbedingung mit dem Faktor „Symmetrie“, $F(1) = 6.98$, $p = .008$. Abbildung 12

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

vergleicht für alle Beobachter den betragsmäßigen Parameter b , der bei einer Parabel dritten Grades ein Maß für Asymmetrie darstellt. Die Beträge für b sind in der hellen Bedingung ($M = 0.055$ rad, $SD = 0.033$ rad) größer als in der dunklen ($M = 0.019$ rad, $SD = 0.015$ rad). Abbildung 13 zeigt die Winkelabweichungen aller Beobachter in der hellen Bedingung, bei der leichte Asymmetrien zu erkennen sind. Im Gegensatz dazu sehen die Winkelabweichungen in der dunklen Bedingung (Abbildung 14) symmetrischer aus. Vergleicht man die Regressionsparabeln der hellen und dunklen Bedingung, so fällt auf, dass die Regressionsparabel der hellen Bedingung drei Nullstellen besitzt, die der dunklen nur eine. Die Nullstellen sind bei einem wahren Winkel von -37.84 Grad und 45.68 Grad.

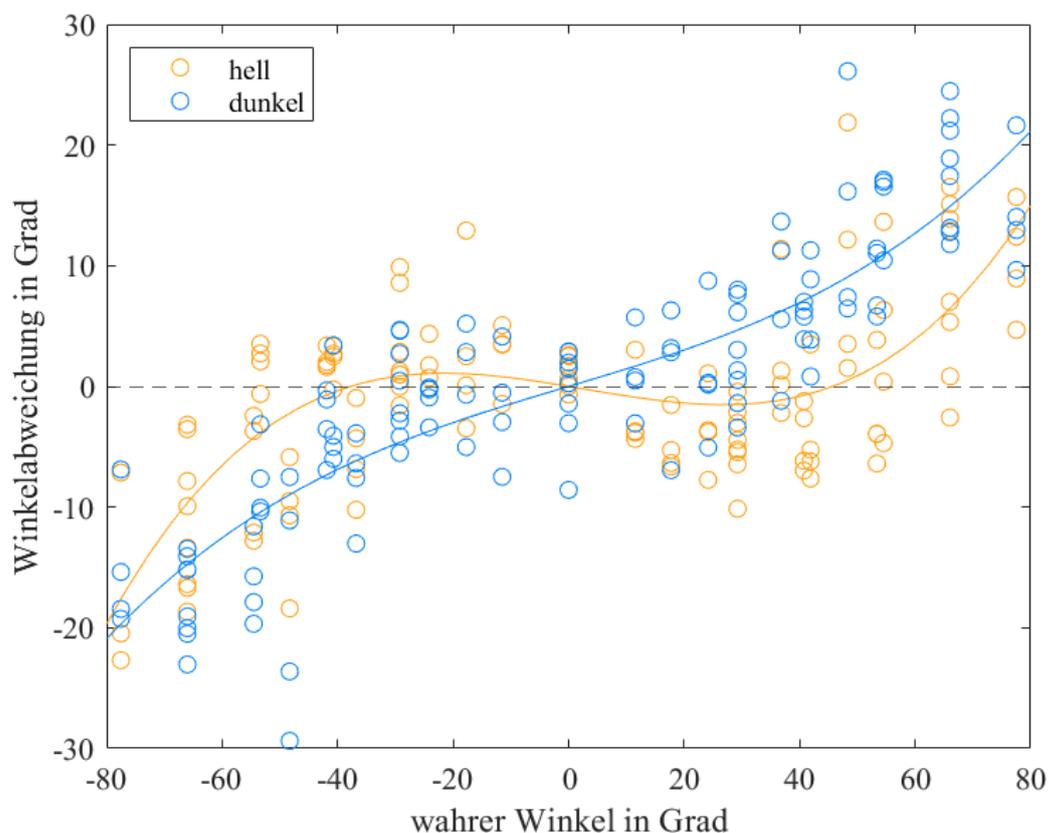


Abbildung 11. Mittlere Winkelabhängigkeit beider Helligkeitsbedingungen (heller versus dunkler Raum) in Abhängigkeit des wahren Winkels sowie deren Regressionsparabeln.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

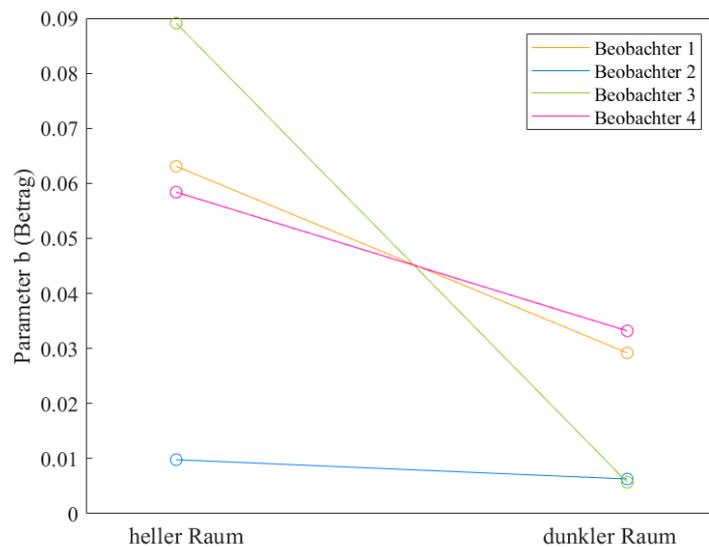


Abbildung 12. Parameter b (Betrag) der Regressionsparabeln $P = ax^3 + bx^2 + cx$ für die verschiedenen Helligkeiten (heller versus dunkler Raum) im Vergleich für alle Beobachter. Die Regressionsparabeln wurden in Bogenmaß berechnet.

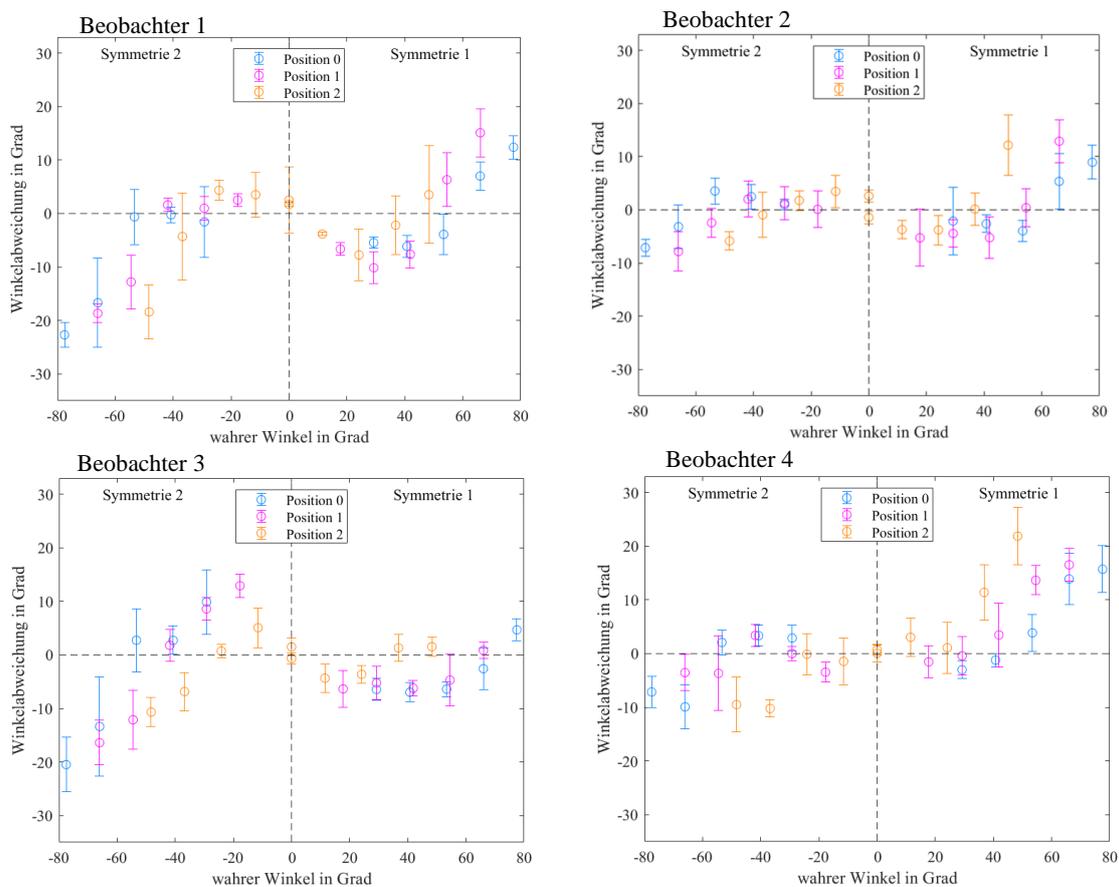


Abbildung 13. Winkelabweichungen (Mittelwerte und Standardabweichungen) in der **hellen** Bedingung in Abhängigkeit des wahren Winkels. Die verschiedenen Beobachterpositionen sind farblich hervorgehoben. Datenplots für die verschiedenen Beobachter (von links oben nach rechts unten Beobachter 1 bis 4).

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

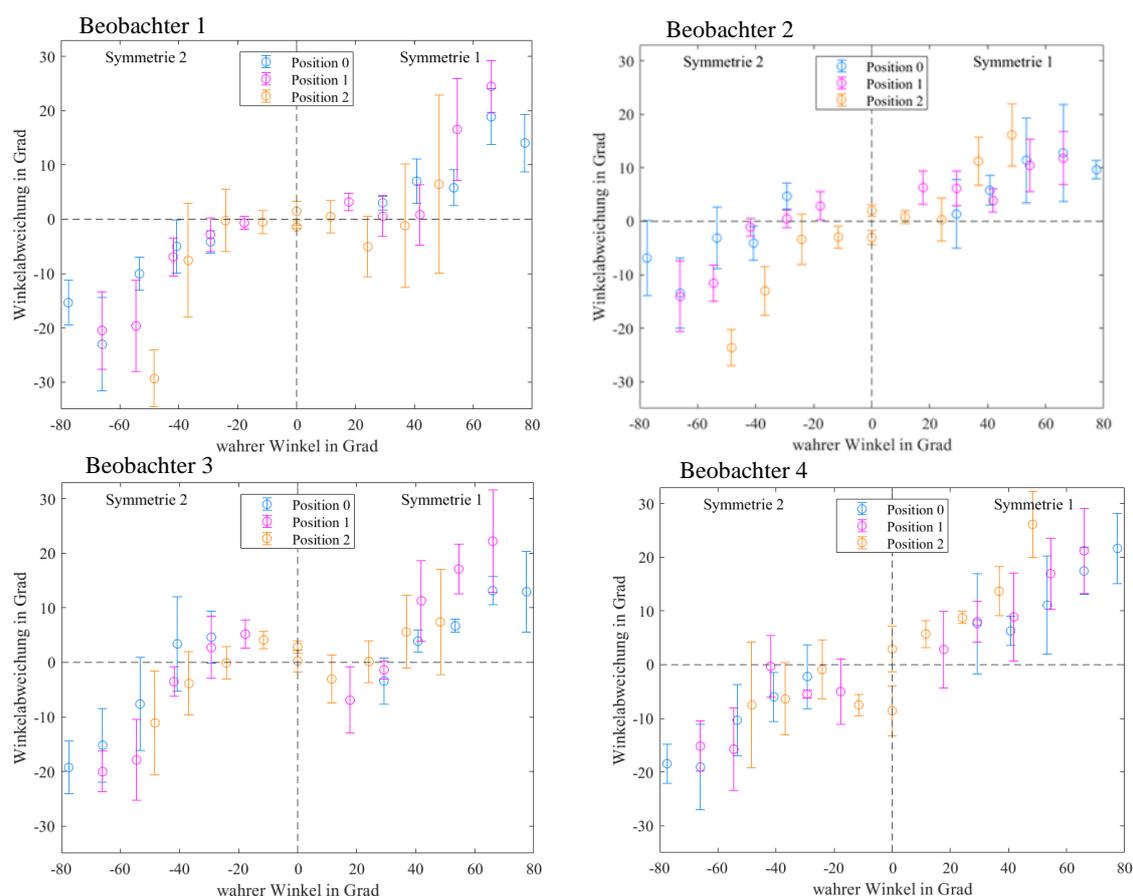


Abbildung 14. Winkelabweichungen (Mittelwerte und Standardabweichungen) in der **dunklen** Bedingung in Abhängigkeit des wahren Winkels. Die verschiedenen Beobachterpositionen sind farblich hervorgehoben. Datenplots für die verschiedenen Beobachter (von links oben nach rechts unten Beobachter 1 bis 4).

3.4 Beobachter

Es zeigte sich auch ein signifikanter Haupteffekt des Faktors „Beobachter“ auf die Winkelabweichung, $F(3) = 14.9$, $p < .001$ sowie ein signifikanter Interaktionseffekt der Beobachter mit dem wahren Winkel, $F(3) = 8.78$, $p < .001$. In Abbildung 15 sind die mittleren Winkelabweichungen in Abhängigkeit zu dem wahren Winkel für die verschiedenen Beobachter gezeichnet. Zudem zeigte sich ein Interaktionseffekt der Beobachter mit der Symmetriebedingung auf die Winkelabweichung, $F(3) = 17.98$, $p < .001$.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

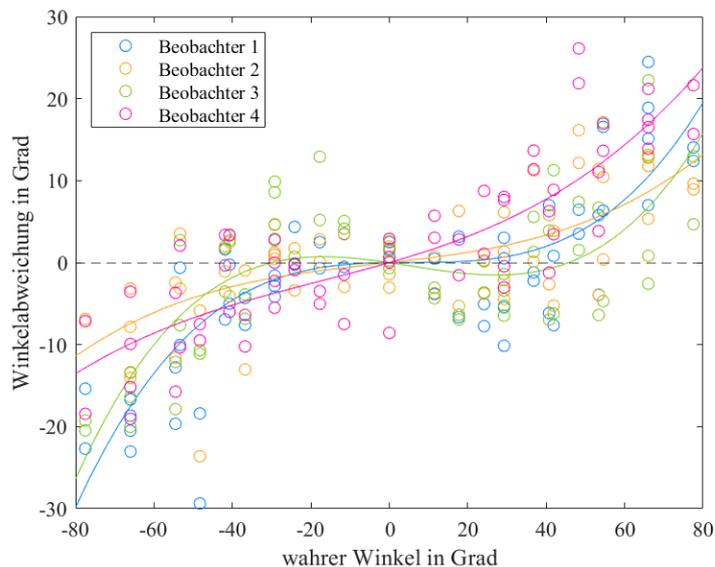


Abbildung 15. Mittlere Winkelabweichungen aller vier Beobachter in Abhängigkeit des wahren Winkels sowie deren Regressionsparabeln.

4.5 Beobachter- und Targetposition

Schließlich wurde eine ANOVA auf die Winkelabweichung (gespiegelt für die zweite Symmetriebedingung) der Faktoren „Target“ und „Beobachterposition“ gerechnet. Es zeigte sich ein Haupteffekt des Faktors „Target“, $F(4) = 69.79$, $p < .001$. Es zeigte sich weder ein signifikanter Haupteffekt der „Beobachterposition“, $F(2) = 2.81$, $p = .062$, noch eine signifikante Interaktion beider Faktoren, $F(8) = 1.6$, $p = .125$. Abbildung 17 vergleicht die Winkelabweichungen und Regressionsparabeln der verschiedenen Beobachterpositionen. Abbildung 16 vergleicht für alle Beobachter und Beobachterpositionen den Parameter a . Hierbei zeigen sich kleine Werte für a bei Beobachterposition 0 ($M = 0.132$ rad, $SD = 0.052$ rad), größere bei Beobachterposition 1 ($M = 0.249$ rad, $SD = 0.110$ rad) und noch größere bei Beobachterposition 2 ($M = 0.507$ rad, $SD = 0.239$ rad). In Abbildung 18 sind die Zeigereinstellungen für die verschiedenen Targets und Beobachterpositionen als Vektoren beispielhaft für Beobachter 1 dargestellt. Für Vektordarstellungen aller Beobachter vergleiche Anhang b.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

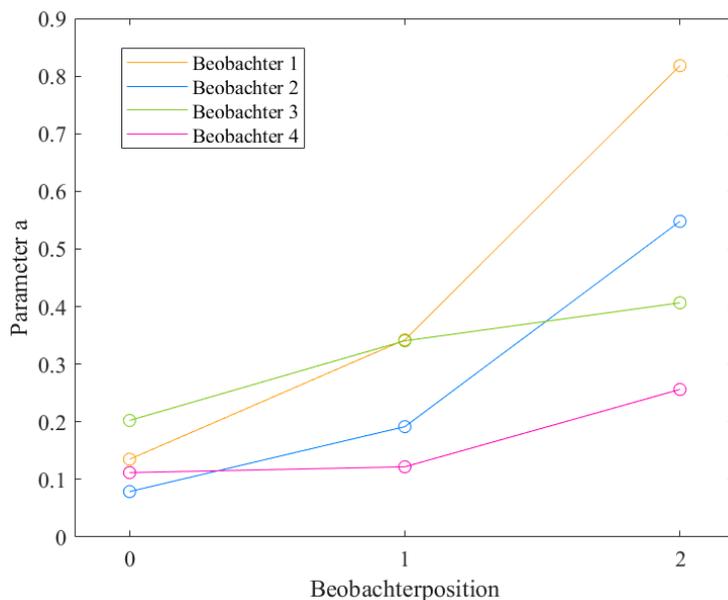


Abbildung 16. Parameter a der Regressionsparabeln $P = ax^3 + bx^2 + cx$ für die verschiedenen Beobachterpositionen (0, 1 & 2) im Vergleich für alle Beobachter. Die Regressionsparabeln wurden in Bogenmaß berechnet.

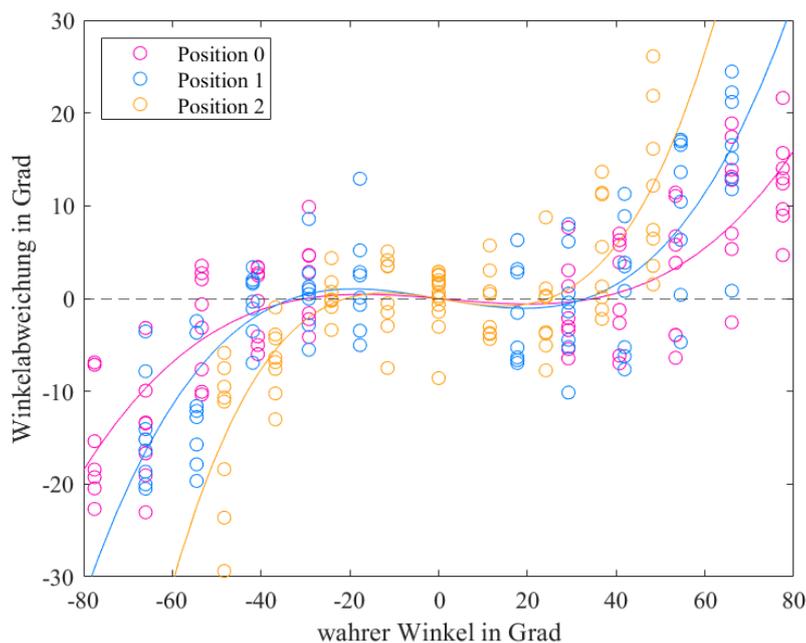


Abbildung 17. Mittlere Winkelabweichungen der Beobachterpositionen (0, 1 & 2) in Abhängigkeit des wahren Winkels sowie deren Regressionsparabeln.

Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum – Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes

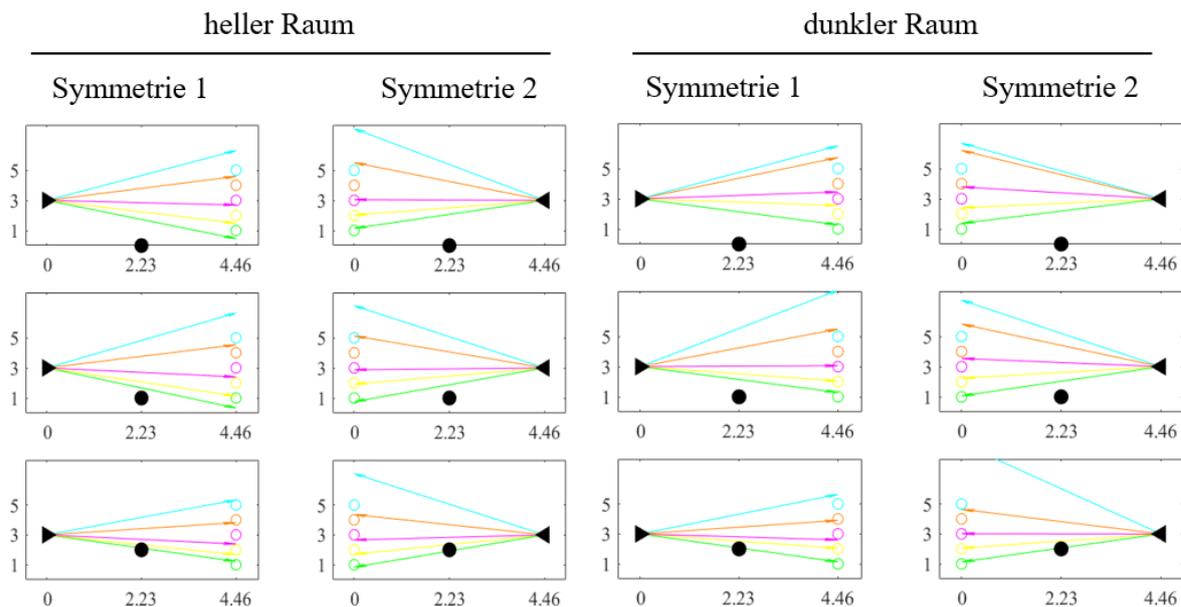


Abbildung 18. Zeigereinstellungen als Vektoren für alle Beobachterpositionen (Beobachterposition 0 in Zeile 1, Beobachterposition 1 in Zeile 2, Beobachterposition 2 in Zeile 3). Die Abstände (in m) entsprechen den tatsächlichen Abständen im Versuchsraum. Beispielhaft für Beobachter 1.

Tabelle 1

Parameter *a*, *b* und *c* der Regressionsparabel $P = ax^3 + bx^2 + cx$ für die verschiedenen Versuchsbedingungen in Bogenmaß

Parameter	Alle Trials	Helligkeit		Symmetrie (gespiegelt)	
		hell	dunkel	1	2
a	0.1069	0.1523	0.0615	-0.3777	-0.3872
b	-0.0099	-0.0210	0.0012	0.9157	0.9535
c	0.0313	-0.0803	0.1429	-0.3732	-0.3810

Parameter	Beobachterposition			Beobachter			
	0	1	2	1	2	3	4
a	0.1321	0.2491	0.5072	0.1551	0.0515	0.1721	0.0491
b	-0.0115	-0.0010	-0.0335	-0.0461	0.0080	-0.0474	0.0458
c	-0.0423	-0.0828	-0.0800	0.0061	0.0534	-0.0719	0.1376

Kapitel 4

Diskussion

Die vorliegende Studie untersuchte die intrinsische Geometrie des visuellen Raumes unter Anwendung des exozentrischen Pointing Paradigmas. Hierbei gab es einen beweglichen Zeiger, welcher von einem Beobachter derart ferngesteuert wurde, dass der Beobachter dachte, der Zeiger zeige auf ein Target. Insgesamt gab es fünf verschiedene Positionen der Targets und drei verschiedene Beobachterpositionen. Dadurch variierte der Winkel am Pointer, welcher von Beobachter und Target eingeschlossen wurde (wahrer Winkel), in den verschiedenen Durchgängen. Die Durchführungen wurden zudem mit zwei verschiedenen Symmetriebedingungen wiederholt: In der einen Bedingung stand der Pointer links vom Beobachter und die Targets rechts und vice versa. Das gesamte Experiment wurde in einem hellen und in einem abgedunkelten Raum durchgeführt, wobei im abgedunkelten Raum deutlich weniger monokulare Hinweisreize zur Verfügung standen, da lediglich der beleuchtete Pointer und ein Target zu sehen waren. Gemessen wurden die Winkelabweichungen der Zeigereinstellungen von dem wahren Winkel. Es wurden weitgehend symmetrische Zeigereinstellungen für beide Symmetriebedingungen (Pointer links und Targets rechts versus Pointer rechts und Targets links) erwartet. Da in der vorliegenden Studie von einer nicht konstanten Krümmung ausgegangen wurde, erwarteten wir ein Effekt des wahren Winkels auf die Winkelabweichung. Basierend auf unseren Resultaten beabsichtigten wir, eine Darstellung von den Geodäten im visuellen Raum zu entwerfen und deren Krümmung zu analysieren. Schließlich wurde davon ausgegangen, dass die Helligkeit, beziehungsweise die Verfügbarkeit monokularer Hinweisreize, die Zeigereinstellungen beeinflusst: Die Zeigereinstellungen im dunklen Raum sollten symmetrischer sein als im hellen Raum.

Die inferenzstatistische Analyse zeigte weder ein Haupteffekt der Symmetriebedingungen noch ein Interaktionseffekt der Symmetriebedingungen mit dem wahren Winkel. Dies deutet in die Richtung, dass die Geometrie des visuellen Raumes

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

symmetrisch ist. Dies ist ein wichtiger Befund, da Autoren früherer Studien ihre Befunde auf Annahme der Symmetrie basierten, ohne diese empirisch zu testen.

Des Weiteren zeigten die Ergebnisse einen Haupteffekt des wahren Winkels. Dieser Effekt deutet darauf hin, dass der visuelle Raum nicht von konstanter Krümmung ist. Dies stimmt mit der Schlussfolgerung von Koenderink et al. (2000) und mit den Horoptermessungen von Zajaczkowska (1956) überein. Abbildung 8 zeigt die Winkelabweichungen in Abhängigkeit des wahren Winkels. Dabei ist ein klares Muster erkennbar, welches mit einer Parabel dritten Grades angenähert wurde (Abbildung 9). Es ist auffällig, dass die Winkelabweichungen bei größeren Winkeln deutlich größer ausfielen. Koenderink et al. maßen auch verschiedene Winkelabweichungen, obwohl sie immer einen wahren Winkel von 30 Grad hatten. Da der wahre Winkel die verschiedenen Target- und Beobachterpositionen impliziert, ist der Effekt folglich in einer Kombination dieser Positionen begründet. Der Einfluss der Positionen wird im Folgenden genauer betrachtet.

Aus Abbildung 17 ist ersichtlich, dass die Zeigereinstellungen durch die verschiedenen Positionen des Beobachters beeinflusst wurden. Dies wird auch auffällig, wenn der Parameter a der Regressionsparabeln verglichen wird (siehe Abbildung 16). Dieser Effekt ließ sich in der inferenzstatistischen Analyse nicht bestätigen: Es wurde zwar ein kleiner p -Wert von .062 berechnet; unter dem Signifikanzniveau von .01 zeigte sich jedoch kein signifikanter Haupteffekt der Beobachterposition. Entgegen unserer Hypothese zeigte sich auch kein Interaktionseffekt der Beobachter- und Targetposition, sondern ein Haupteffekt der Targetposition. Daraus lässt sich interpretieren, dass weder der Abstand zwischen Beobachter und Pointer noch der Abstand zwischen Beobachter und Target von globaler Bedeutsamkeit für die Krümmung sind. Vielmehr deutet es darauf hin, dass die Respektiven Positionen von Pointer und Target wichtig sind. Gegensätzlich dazu hatten wir erwartet, dass die Position des Pointers sekundär wäre. Auch Koenderink et al. (2000) betrachteten nicht die Position des Pointers, sondern die Position des Beobachters bezüglich der des Targets: Sie platzierten Pointer und Target an zwei Ecken eines gleichseitigen Dreiecks und den Beobachter in dessen Baryzentrum. Wurde der Abstand von Beobachter und Target erhöht, so erhöhte sich automatisch auch der zwischen Pointer und Target. In Anbetracht unserer Ergebnisse scheint es möglich, dass der von Koenderink et al. gefundene Effekt also auf den Abstand zwischen Pointer und Target zurückzuführen ist und sich lediglich indirekt durch den Abstand zwischen Beobachter und Target widerspiegelt. Es ist jedoch anzumerken, dass die vorliegende Studie nur vergleichsweise kleine Abstände maß

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

(unter 6.5 m). Es ist denkbar, dass sich bei größeren Abständen andere Ergebnisse zeigen. Auch wäre zu kritisieren, dass unsere Resultate durch andere Umstände erklärt werden könnten. Da die fünf Targets immer an der gleichen Position stehen, wäre es möglich, dass der Effekt des Abstandes zwischen Pointer und Target auf die Winkelabweichung nicht an dem Abstand liegt, sondern auf die Position der Targets im Raum zurückzuführen ist. Beispielsweise wäre es möglich, dass die räumliche Erinnerung an die Targetpositionen die Zeigereinstellungen beeinflusst. Aufgrund der Sperrigkeit des Pointers manipulierten wir dessen Position nicht direkt. Wir sind der Überzeugung, dass man die Pointerposition in einem weiteren Experiment direkt manipulieren müsste, um klare Erkenntnis über den Einfluss der Pointerposition zu erlangen. Abhängig von der Position des Pointers oder nicht, der Effekt der Targetposition auf die Krümmung des visuellen Raumes ist deutlich.

Die Vektordarstellung (Abbildung 18) der Zeigereinstellungen veranschaulicht, dass der Zeiger bei Target 4 & 5 nach weiter hinten und bei Target 1, 2 & 3 nach weiter vorne als das Target gesteuert wurde. Steuerungen nach weiter *hinten* spiegeln eine elliptische Krümmung wider, da die Winkelsumme eines Dreiecks mit den Eckpunkten Beobachter, Pointer und Target hier im visuellen Raum über 180 Grad betragen würde. Gegenteilig hierzu würde die Winkelsumme eines Dreiecks im visuellen Raum bei Steuerungen des Zeigers *vor* das Target unter 180 Grad betragen, was einer hyperbolischen Krümmung entspricht. Die Krümmung des visuellen Raumes ist für nahe Targets (Target 1, 2 & 3) also hyperbolisch und für ferne Targets (Target 4 & 5) elliptisch. Dies ist auch in Abbildung 19 zu sehen, welche die Winkelabweichungen aller Beobachter und Experimentalbedingungen (Beobachterposition, Symmetriebedingung, Helligkeit) für die verschiedenen Targets farblich (blau für elliptische Krümmung, rot für hyperbolische Krümmung) zeigt. Dieses Muster wiederholt sich unabhängig von Beobachterposition und Symmetriebedingung; allein die Helligkeit zeigte hier einen Unterschied: In der dunklen Bedingung wurde der Zeiger oft auch so eingestellt, dass er bei den weiter vorne stehenden Targets hinter die Targets zeigte.

Basierend auf den oben genannten Darstellungen der Winkelabweichungen wagten wir einen Versuch, die Geodäten graphisch abzubilden. In Abbildung 21 sind die Geodäten als Kreisbogen für die einzelnen Zeigereinstellungen dargestellt. Für detailliertere Darstellungen vergleiche Anhang c. Es ist anzumerken, dass wir keinen Beweis haben, dass Geodäten im visuellen Raum tatsächlich Kreisbogen sind. Dennoch ist die Darstellung der Krümmung mit Kreisbogen gut anschaulich. Vergleicht man die Kreisbogen mit den

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Horoptermessungen von Zajaczkowska (1956), so fällt auf, dass diese gegensätzlich sind. Intuitiv scheint das einen Widerspruch zu den von uns gemessenen Krümmungsrichtungen (in der Nähe hyperbolisch, in der Ferne elliptisch) darzustellen. Im Folgenden wird begründet, warum wir die gegenteiligen Krümmungen der Horopter und Kreisbogen nicht als Widerspruch sehen.

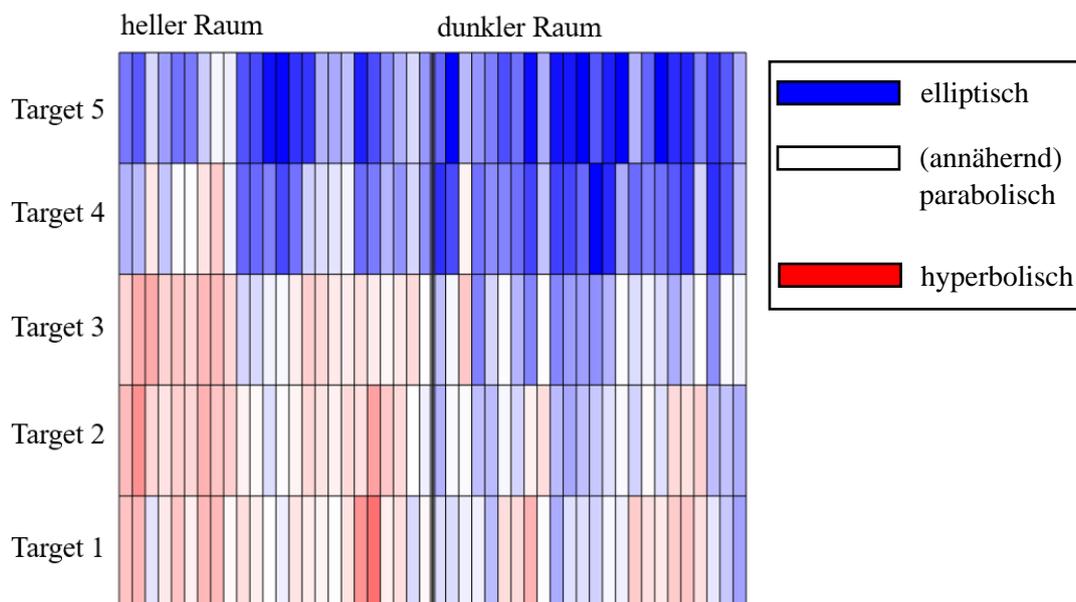


Abbildung 19. Winkelabweichungen (rot für hyperbolische Krümmung, blau für elliptische Krümmung) aller Beobachter und Experimentalbedingungen (Beobachterposition, Symmetriebedingung, Helligkeit) für die verschiedenen Targets. Größere Winkelabweichungen sind durch eine gesättigtere Farbe dargestellt.

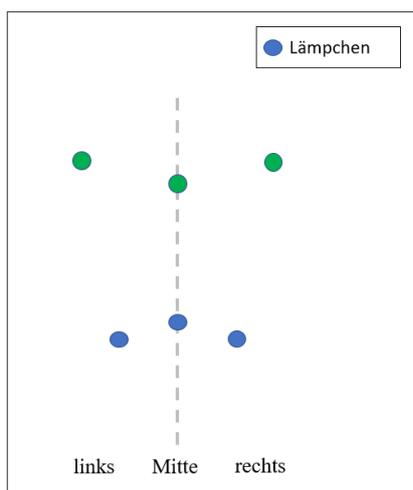


Abbildung 20. Schematischer und vereinfachter Versuchsaufbau zur Horoptermessung. Die Messungen wurden in verschiedenen Tiefen (blau vorne, grün hinten) durchgeführt. Links und rechts wurden Lämpchen fixiert. In der Mitte befand sich ein drittes, in der Tiefe (hier dargestellt als gestrichelte Linie) bewegbares Lämpchen. Wenn der Beobachter alle Lämpchen als gerade Linie wahrnahm, wurde das sich bewegende Lämpchen in der Mitte angehalten.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

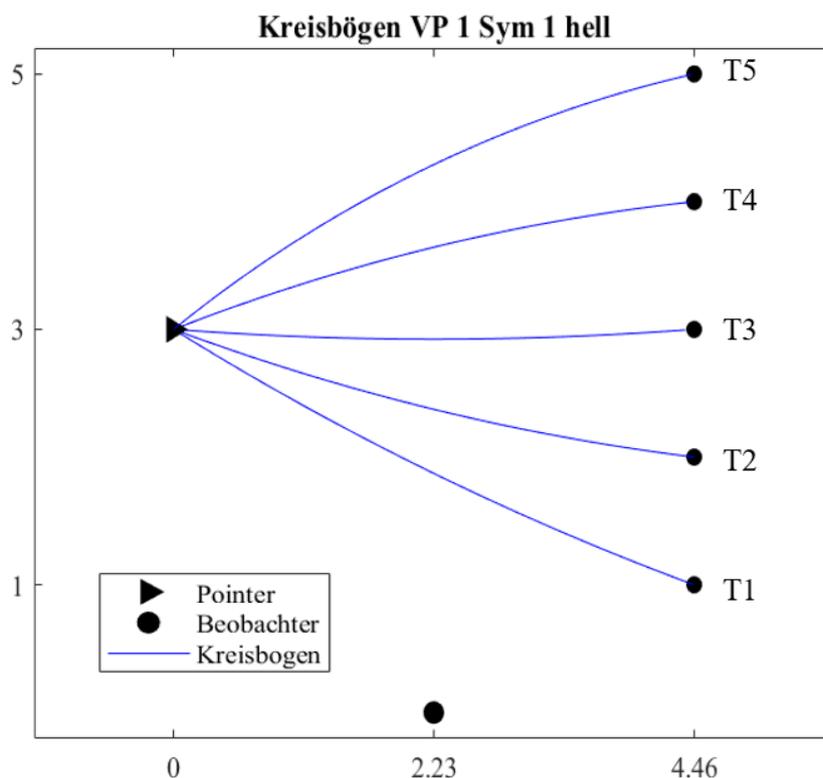


Abbildung 21. Kreisbogendarstellung der Geodäten im visuellen Raum. Die Kreisbögen sind definiert durch den Punkt des Pointers, den des Targets und durch die Tangente der Zeigereinstellung. Die Targets (Target 1 bis Target 5) sind mit T1 bis T5 markiert. Die Abstände (in m) entsprechen den tatsächlichen Abständen im Versuchsraum. Beispielhaft für Beobachter 1 in der ersten Symmetriebedingung (Pointer links) mit Beobachterposition 0.

Vorerst nehmen wir an, dass die Krümmung des visuellen Raumes in der gleichen Tiefe links und rechts weniger stark ist als mittig (also direkt vor dem Beobachter). Eine Begründung für diese Annahme wird weiter unten aufgezeigt. Unter der Annahme betrachten wir, welche Horopterkrümmungen wir auf Grundlage unserer Ergebnisse vorhersagen können und vergleichen diese mit den von Zajaczkowska (1956) gemessenen Horoptern. Für die Messung der empirischen Horopter fixierte die Autorin Lichtpunkte links und rechts in einer bestimmten Entfernung zum Beobachter, die in mehreren Durchgängen variierte. In der Mitte des linken und rechten Lichtpunktes befand sich ein dritter³ Lichtpunkt, der jedoch nicht fixiert war, sondern sich in der Tiefe bewegte. Sobald sich der mittlere Lichtpunkt in der Tiefe befand, in der der Beobachter dachte, die drei Punkte bilden eine Gerade, wurde der Lichtpunkt angehalten. Befand sich der Lichtpunkt hinter den

³ Vereinfachte Darstellung. Im eigentlichen Versuchsaufbau gab es mehrere Lichtpunkte. Für uns ist nur einer relevant.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

anderen beiden, wurde ein positiver Horopter gemessen und vice versa. Ein schematischer Versuchsaufbau ist in Abbildung 20 dargestellt. Die Lichtpunkte links und rechts sind vergleichbar mit unseren Targets, die in einer Symmetriebedingung links und in der anderen rechts angebracht wurden. Die verschiedenen Entfernungen sind mit unseren fünf Targets vergleichbar, die in verschiedenen Tiefen im Raum standen. In der Nähe, also für Target 1, 2 & 3, erwies sich bei unseren Messungen eine negative Krümmung: Man nimmt demnach nahe Objekte als noch näher wahr. Daher gehen wir davon aus, dass man in der Nähe das mittlere Lämpchen weiter hinten als die anderen platzieren würde. Ein tatsächlich weiter hinten stehendes Lämpchen würde aufgrund der negativen Krümmung aussehen, als würde es weiter vorne, also auf der gleichen Höhe wie die anderen Lämpchen, stehen. Selbstverständlich wäre dem nur so, wenn oben genannte Annahme, dass die Krümmung in der Mitte am stärksten ist, stimmt. Für nahe Lämpchen würden wir also einen positiv gekrümmten Horopter erwarten, was zu den Messungen von Zajackowska passt. In der Ferne, also für Target 4 & 5, zeigten unsere Messungen eine positive Krümmung: Ferne Objekte nimmt man als noch ferner wahr. Demzufolge gehen wir davon aus, dass man in der Ferne das mittlere Lämpchen weiter vorne als die anderen platzieren würde. Aufgrund der positiven Krümmung würde ein Lämpchen, das tatsächlich weiter vorne steht, aussehen, als stünde es weiter hinten, also in der gleichen Tiefe wie die beiden Lämpchen links und rechts. Unsere Ergebnisse würden also zu einem in der Ferne negativ gekrümmten Horopter passen, was mit den Ergebnissen von Zajackowska übereinstimmt. Die Horoptermessungen passen also zu den Zeigereinstellungen.

Einen Einwand gegen diese Schlussfolgerung könnte sein, dass die oben gestellt Annahme, nach welcher die Krümmung bei gleicher Tiefe in der Mitte stärker ist als außen, nicht stimmen könnte. Tatsächlich wäre es sinnvoll, diese in einem zukünftigen Experiment zu testen. Hierfür würde sich ein exozentrisches Pointing Experiment mit Targets links und rechts vom Beobachter (wie bei unserem Experiment) und weiter mittig platzierten Targets anbieten. Aufgrund der Resultate der vorliegenden Studie kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Abstand zwischen Pointer und Target auch einen Einfluss auf die Krümmung hat. Diesbezüglich sollte darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen Pointer und den mittleren Targets an den zwischen Pointer und äußeren Targets angepasst wird. Stärker ausgeprägte Winkelabweichungen für die mittleren Targets könnten unsere Annahme belegen. Es stellt sich die Frage, wieso wir von dieser Annahme ausgehen. Vorerst kann man davon ausgehen, dass die Krümmung in der Mitte und außen nicht gleich stark ist

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

– sonst wären alle empirischen Horopter gerade Linien. Wegen der Kurvenform der Horopter kann man darauf schließen, dass Krümmung des visuellen Feldes sich entweder mehr auf die Mitte oder mehr auf die Außenseiten auswirkt. Wir nahmen an, dass die Krümmung also in der Mitte am größten ist, da dies im Einklang mit der Kreisbogendarstellung ist, bei der die Abweichung zu der tatsächlichen Verbindungslinie von Pointer und Target in der Mitte am größten ausfällt. Infolgedessen sehen wir in den Horoptermessungen unsere Theorie eines in der Nähe hyperbolischen und in der Ferne elliptischen visuellen Raumes bestätigt.

Gegensätzlich dazu fanden Koenderink et al. (2000) Evidenz für einen in der Nähe elliptischen und in der Ferne hyperbolischen visuellen Raum. Dies ist ein bedeutender Widerspruch. Allerdings sind die Begriffe „Nähe“ und „Ferne“ relativ. Die vorliegende Studie maß vergleichsweise kleine Abstände (unter 6.5 m), während Koenderink et al. Abstände von über 20 m maßen. So könnte man vermuten, dass die Krümmung nicht nur einmal von elliptisch über parabolisch zu hyperbolisch wechselt, sondern mehrfach zwischen den verschiedenen Krümmungsrichtungen alterniert. Kongruent zu dieser Theorie ist auch, dass Koenderink et al. neben einer elliptischen Krümmung in der Nähe und einer hyperbolischen Krümmung in der Ferne Evidenz dafür fanden, dass die Krümmung des visuellen Raumes der horizontalen Ebene „bei sehr großen Distanzen [...] parabolisch wird“ (Übersetzung des Autors aus dem Englischen). In einem Folgeexperiment könnten Winkelabweichungen für ein großes Spektrum an Distanzen zu den Targets gemessen werden, um vergleichbarere Daten für die Krümmungen (elliptisch, parabolisch oder hyperbolisch) bei verschiedenen Distanzen zum Beobachter zu erhalten. So könnte die Theorie zu alternierenden Krümmungsrichtungen bestätigt oder abgelehnt werden.

Im Weiteren zeigten sich ein Haupteffekt des Beobachters und ein Interaktionseffekt der Faktoren „Beobachter“ und „wahrer Winkel“. Daraus lässt sich schließen, dass es interpersonelle Unterschiede der Geometrie des visuellen Raumes gibt. Da sich das allgemeine Muster bei allen Beobachtern jedoch wiederholt, halten wir diese Unterschiede für sekundär und werden im Weiteren nicht darauf eingehen.

Als nächstes zeigte sich ein Haupteffekt des Faktors „Helligkeit“ und eine Interaktion der Faktoren „Helligkeit“ und „wahrer Winkel“: Die Zeigereinstellungen in der hellen Bedingung wiesen kleinere Abweichungen von dem wahren Winkel als in der dunkeln Bedingung vor. Zudem wurden in der hellen Bedingung kleinere Standardabweichungen im

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Vergleich zu der dunklen Bedingung gemessen. Im hellen Innenraum konnte der Zeiger also genauer und zielgerichteter eingestellt werden als im dunklen. Es ist naheliegend, dass dies an den zahlreichen monokularen Hinweisreizen lag: Neben Pointer und Target konnten die Beobachter sich hier an Tiefenhinweisreizen im gesamten Raum orientieren. Beispielsweise konnte die Raumgeometrie Aufschluss auf die Tiefe der Targets und auf den Winkel des Pointers geben: Decke und Wände zeigten klare geometrische Linien, an denen sich die Beobachter orientieren konnten. Da in der hellen Bedingung immer alle fünf Targets zu sehen waren, welche je im Abstand von einem Meter zueinander positioniert waren, gab es auch einen zuverlässigen Hinweis auf Abstände im Raum.

Vergleicht man die Winkelabweichungen der hellen und dunklen Bedingung (siehe Abbildung 11 und Abbildung 19), so fällt auf, dass die Krümmung in der dunklen Bedingung deutlich positiver ausfiel. Im hellen Raum wechselte die Krümmung von hyperbolisch (negative Krümmung bei negativer Winkelabweichung in der ersten Symmetriebedingung beziehungsweise bei positiver Winkelabweichung in der zweiten Symmetriebedingung) zu elliptisch. Bei einem wahren Winkel von ungefähr -37.84 und 45.68 Grad zeigte die Regressionsparabel der hellen Bedingung Nullstellen. Hier war die Krümmung also annähernd parabolisch. Zwar wurden auch negative Krümmungen im abgedunkelten Raum gefunden, dennoch waren die Krümmungen im Allgemeinen positiver als im hellen Raum. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass monokulare Hinweisreize die Krümmung des visuellen Raumes beeinflussen.

Aufgrund dieser Resultate kann davon ausgegangen werden, dass die Verfügbarkeit monokularer Hinweisreize die intrinsische Geometrie des visuellen Raumes beeinflusst. Eine Geometrie, welche neben binokularen auch stark von monokularen Hinweisreizen beeinflusst wird, scheint komplexer als bisher angenommen. Da die Ergebnismuster des dunklen und hellen Raumes dennoch sehr ähnlich waren, kann davon ausgegangen werden, dass es nicht zwei gänzlich verschiedene intrinsische Geometrien des visuellen Raumes gibt – eine ohne und eine mit monokularen Hinweisreizen – sondern eine Geometrie, welche auch von monokularen Tiefenhinweisreizen beeinflusst wird. Wie genau sich dieser Einfluss auswirkt, ist eine Frage, die es in zukünftigen Studien zu klären gilt. So könnten zukünftige Experimente in komplett leeren Räumen mit gezielt kontrollierten Hinweisreizen an unterschiedlichen Stellen des Raumes durchgeführt werden, um zu testen, wie diese die Tiefenwahrnehmung lenken.

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Eine Alternativerklärung der Ergebnisse könnte sein, dass im hellen Raum neben weiteren monokularen auch eine größere Anzahl an binokularen Hinweisreizen verfügbar waren. Es könnte angenommen werden, dass die Effekte auf die binokularen Hinweisreize zurückzuführen sind. Wir halten dies jedoch für unwahrscheinlich, da wesentliche binokularen Hinweisreize für das exozentrische Pointing (Zeiger und Target) auch im Dunklen zu sehen waren, während wichtige monokulare Hinweisreize (Raumgeometrie, Schattierungsunterschiede) nur im Hellen sichtbar waren.

Überdies zeigte sich eine Interaktion der Faktoren „Symmetrie“ und „Helligkeit“: In dem hellen Versuchsraum waren die Ergebnisse weniger symmetrisch als im dunklen. Die naheliegendste Erklärung hierfür sind die zahlreichen monokularen Hinweisreize im hellen Versuchsraum: Obgleich Beobachter, Pointer und Targets exakt positioniert wurden, befanden sich auch nicht symmetrische Objekte im Versuchsraum: Plakate an den Wänden sowie Tische und verschiedene Geräte anderer Experimente wurden nicht aus dem Raum entfernt, sodass es eine Vielzahl an nicht symmetrischen monokularen Hinweisreizen gab. Es ist demnach anzunehmen, dass monokulare Reize auch als Störreize fungieren können. In der vorliegenden Studie wurden solche Störreize nicht kontrolliert, damit der Einfluss von Symmetrie so natürlich wie möglich einfließen konnte. Jedoch könnten Störreize in einer weiteren Studie gezielt kontrolliert werden, um deren Einfluss auf die Krümmung des visuellen Raumes zu analysieren.

An diesem Punkt stellt sich die Frage, ob zukünftige Studien zum visuellen Raum im Dunklen, wie beispielsweise bei Blank (1953) oder Indow und Watanabe (1988) oder im Hellen, wie bei Koenderink et al. (2000), durchgeführt werden sollen. Hier zeigen sich basierend auf der vorliegenden Studie für beide Seiten Vor- und Nachteile, die bezüglich des Studienziels evaluiert werden sollten. Soll eine anwendungsorientierte Studie durchgeführt werden, ist basierend auf den Ergebnissen dieser Studie vorzuziehen, die Experimente im Hellen durchzuführen: Es kann angenommen werden, dass es in der Anwendung eine Vielzahl an monokularen Hinweisreizen geben wird. Da in der vorliegenden Studie gezeigt wurde, dass diese den visuellen Raum beeinflussen, ist deren experimentelle Erprobung im Anwendungskontext von Bedeutsamkeit. Auch zu Experimentalfragen über die Natur der intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes sind Experimente im Hellen erforderlich, um das gesamte Spektrum zu erforschen. Jedoch ist es bei zielgerichteten Fragen, die eine größere Kontrolle erfordern, ratsam, das Experiment vorerst im Dunklen durchzuführen, damit es zu keiner durch visuelle Störreize hervorgerufene Verzerrung kommt. Eine

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

denkbare Methode, die Kontrollierbarkeit mit der Verfügbarkeit monokularer Reize zu vereinbaren, könnte die virtuelle Realität darstellen: Hier können visuelle Reize gezielt platziert und ungewollte Reize gelöscht werden.

Schließlich ist anzumerken, dass sich diese Studie auf visuelle Reize beschränkte. Es könnte interessant sein, den visuellen Raum auf einen möglichen Einfluss anderer Modalitäten zu prüfen. Beispielsweise geben auditive Reize Hinweise auf die Entfernung von Objekten, was sich in der visuellen Repräsentation deren Tiefenwahrnehmung widerspiegeln könnte. In einem Folgeexperiment könnte untersucht werden, ob im Rahmen des exozentrischen Pointing Paradigmas für auditiv verschieden weit entfernt wirkende Objekte, die tatsächlich gleichweit entfernt sind, verschiedene Winkelabweichungen gemessen werden. Die auditive Vortäuschung verschieden weit entfernter Targets könnte durch Lautsprecher unter den Targets ermöglicht werden. Wird den Probanden gesagt, dass die Lautsprecher immer den gleichen Ton von sich geben, wobei sie tatsächlich verschieden laute Töne ausstrahlen, verleihe dies den Eindruck von einem weiter beziehungsweise weniger weit entfernten Objekt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich systematische Winkelabweichungen der Zeigereinstellungen zeigten. Passend zu den Ergebnissen von Koenderink et al. (2000) und Zajaczkowska (1956) fanden wir weitere Evidenz für eine nicht konstante Krümmung. Gegenteilig zu Koenderink et al. zeigte sich für nahe Targets eine hyperbolische Krümmung und für fernere Targets eine elliptische Krümmung. Eine mögliche Erklärung liegt in der Verwendung anderer Entfernungen der Targets, weshalb wir die Theorie aufstellten, dass die Krümmungsrichtung für verschiedene Entfernungen mehrfach alterniert. Überdies konnten wir unsere Hypothese eines symmetrischen visuellen Raumes bestätigen. Schließlich konnten wir zeigen, dass die Verfügbarkeit monokularer Tiefenhinweisreize die intrinsische Geometrie des visuellen Raumes beeinflusst: In der dunklen Bedingung, bei welcher außer Pointer und Target keine monokularen Reize sichtbar waren, fanden wir größere und ungenauere Winkelabweichungen. Es wurden mögliche Nachfolgeexperimente aufgezeigt, um Erklärungsansätze zu überprüfen. Diesen nachzugehen könnte zu einem besseren Verständnis der intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes führen.

Literaturverzeichnis

- Blank, A. A. (1953). An account of recent investigations relating to the Luneburg theory of binocular space perception. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, 30(7), 374-379.
- Erkelens, C. J. (2015). The Perspective Structure of Visual Space. *I-Perception*, 6(5), doi: 10.1177/2041669515613672
- Foley, J. M. (1972). The size-distance relation and intrinsic geometry of visual space: implications for procession. *Vision Research*, 12(2), 323-332.
- Foley, J. M., Ribeiro-Filho, N.P., & Da Silva, J. A. (2004). Visual perception of extent and the geometry of visual space. *Vision Research*, 44(2), 147-156.
- Gauss, C. F. (1828). *Disquisitiones generales circa superficies curvas* (Vol. 1), (pp. 24-25). Göttingen: Typis Dieterichianis.
- Indow, T., & Watanabe, T. (1988). Alleys on an extensive apparent frontoparallel plane: a second experiment. *Perception*, 17(5), 647-666.
- Koenderink, J. J., van Doorn, A. J., & Lappin, J. S. (2000). Direct measurement of the curvature of visual space. *Perception*, 29(1), 69-79. doi: 10.1068/p2921
- Luneburg, R. K. (1947). Mathematical analysis of binocular vision. *Princeton University Press*.
- Zajackowska, A. (1956). Experimental test of Luneburg's theory; horopter and alley experiments. *Journal of the Optical Society of America*, 46(7), 514-527.

Anhang zur Bachelorarbeit

Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum–
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes

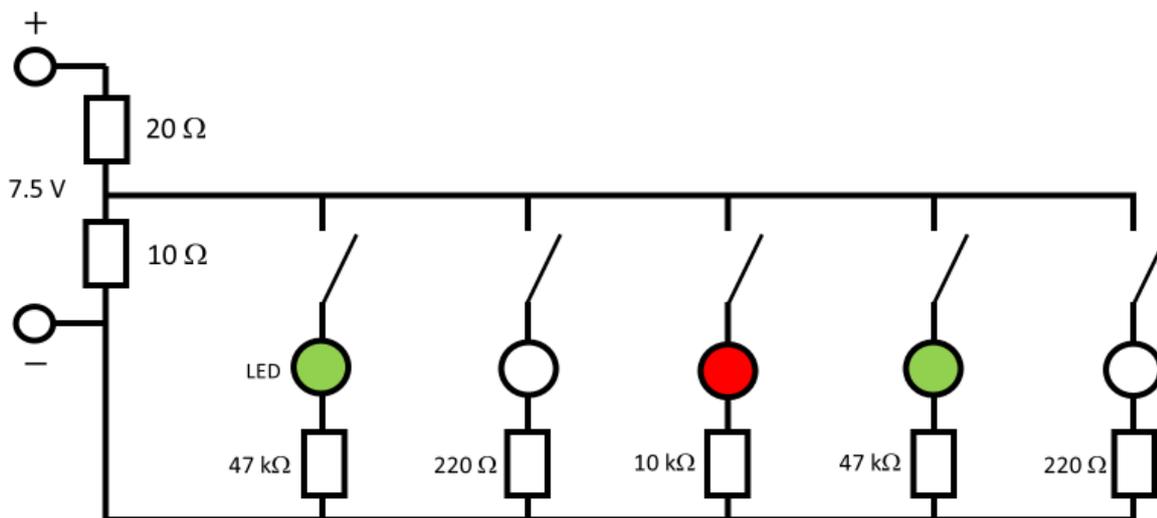
Von Tabea Miller

Anhangsverzeichnis

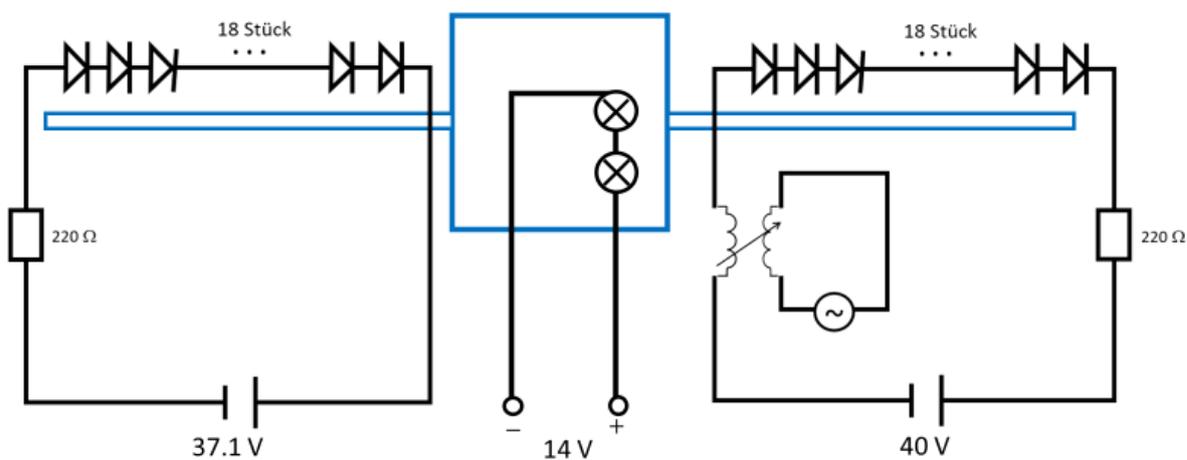
Anhang a.....	1
Anhang b.....	2
Anhang c.....	5

Anhang a

Schaltung der LEDs der Targets.



Schaltung des Pointers.

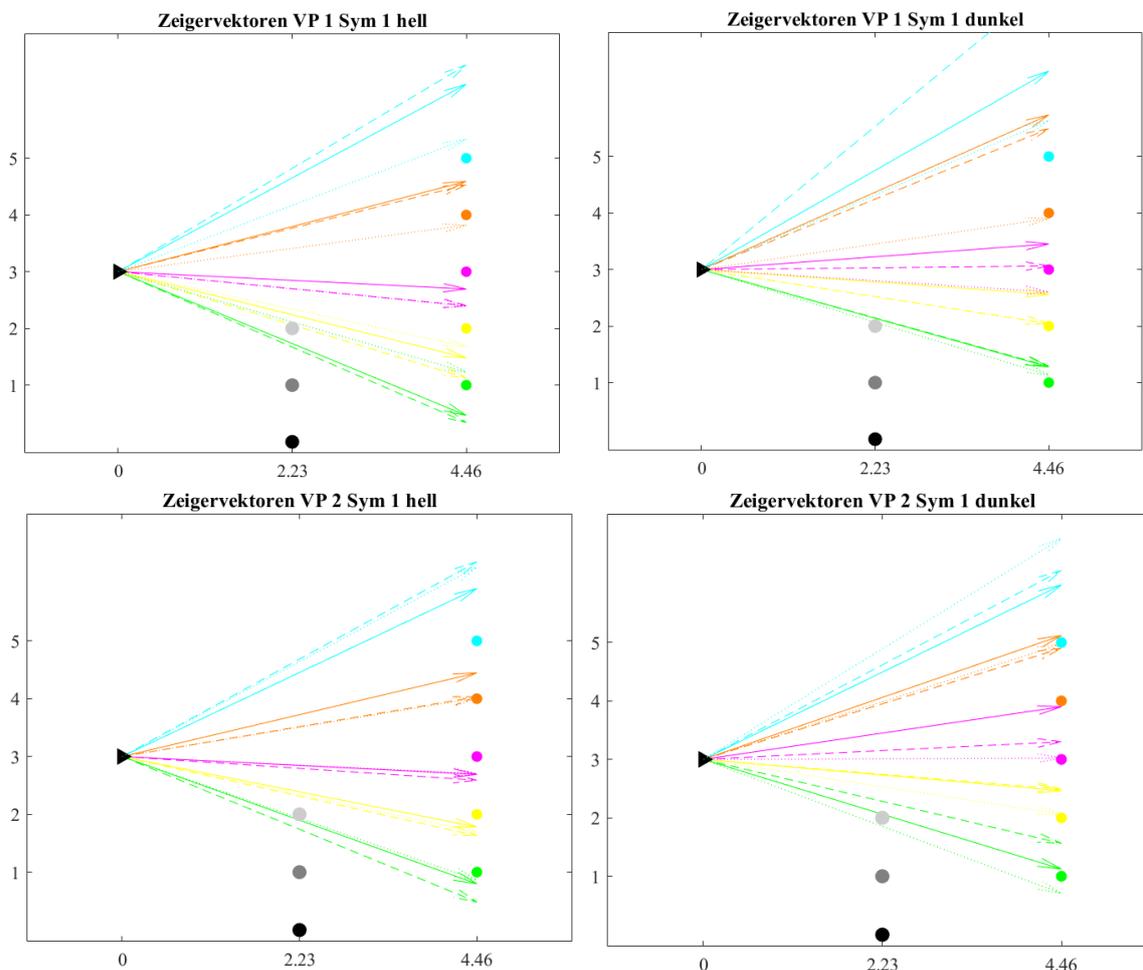
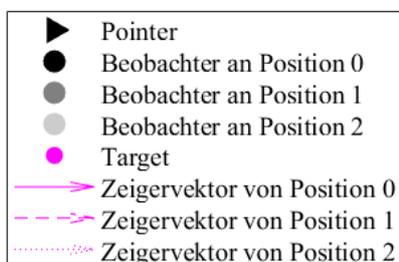


*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

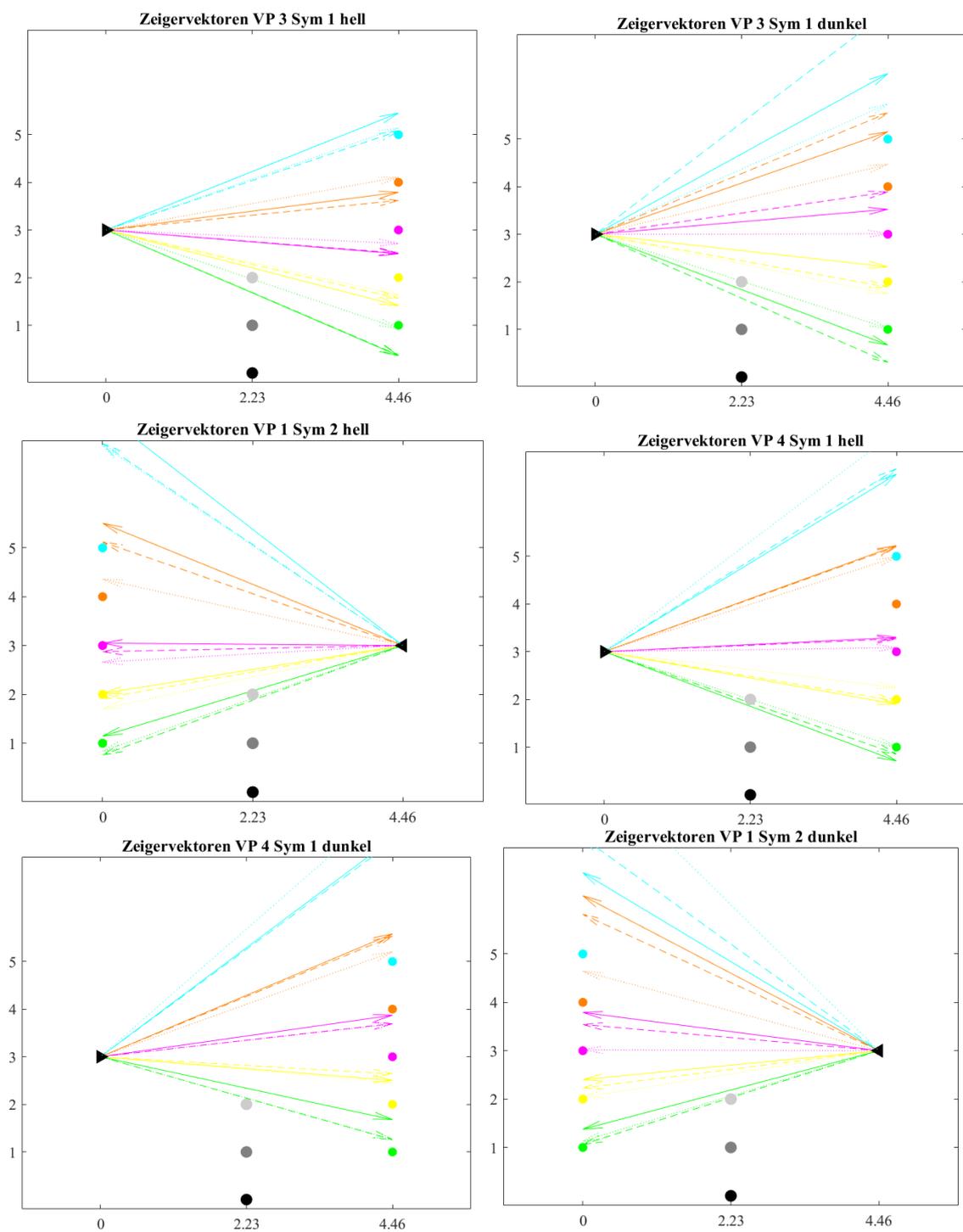
Anhang b

Vektordarstellung der Zeigereinstellungen für alle Beobachter (VP 1 bis 4), Helligkeitsbedingungen (hell versus dunkel), Symmetrien („Sym 1“ versus „Sym 2“) und für alle Beobachter – und Targetpositionen. Die verschiedenen Beobachterpositionen sind farblich markiert (Position 0 in schwarz, Position 1 in dunkelgrau, Position 2 in hellgrau). Die verschiedenen Targets sind farblich markiert (Target 1 in grün, Target 2 in gelb, Target 3 in magenta, Target 4 in orange, Target 5 in cyan). Die Vektoren der Zeigerdarstellungen (durchgezogen für Position 0, gestrichelt für Position 1, gepunktet für Position 2) passen farblich zu dem Target, auf das gesteuert wurde. Die Distanzen (in m) entsprechen den Distanzen des echten Versuchsaufbaus.

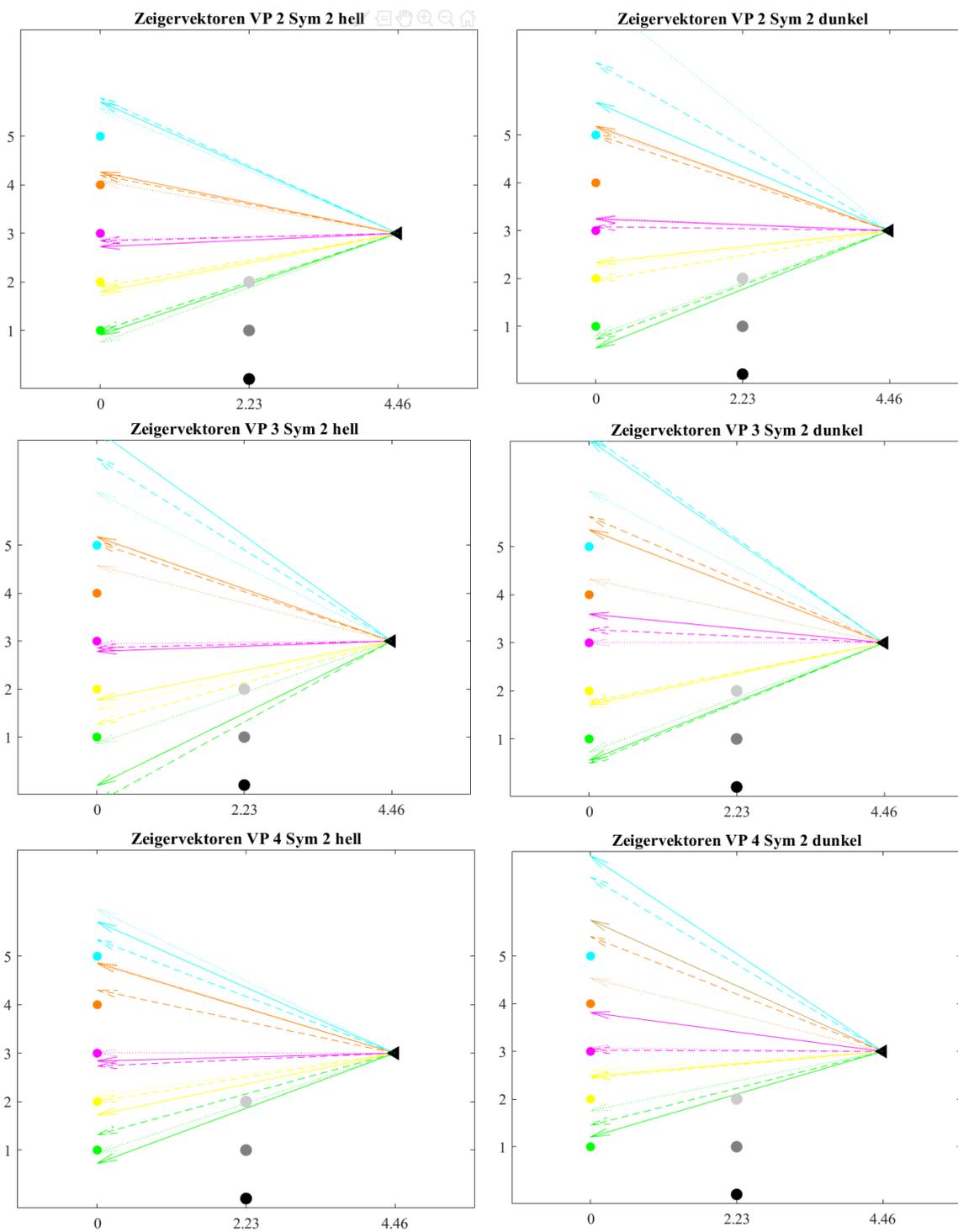
Legende für alle Plots:



*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*



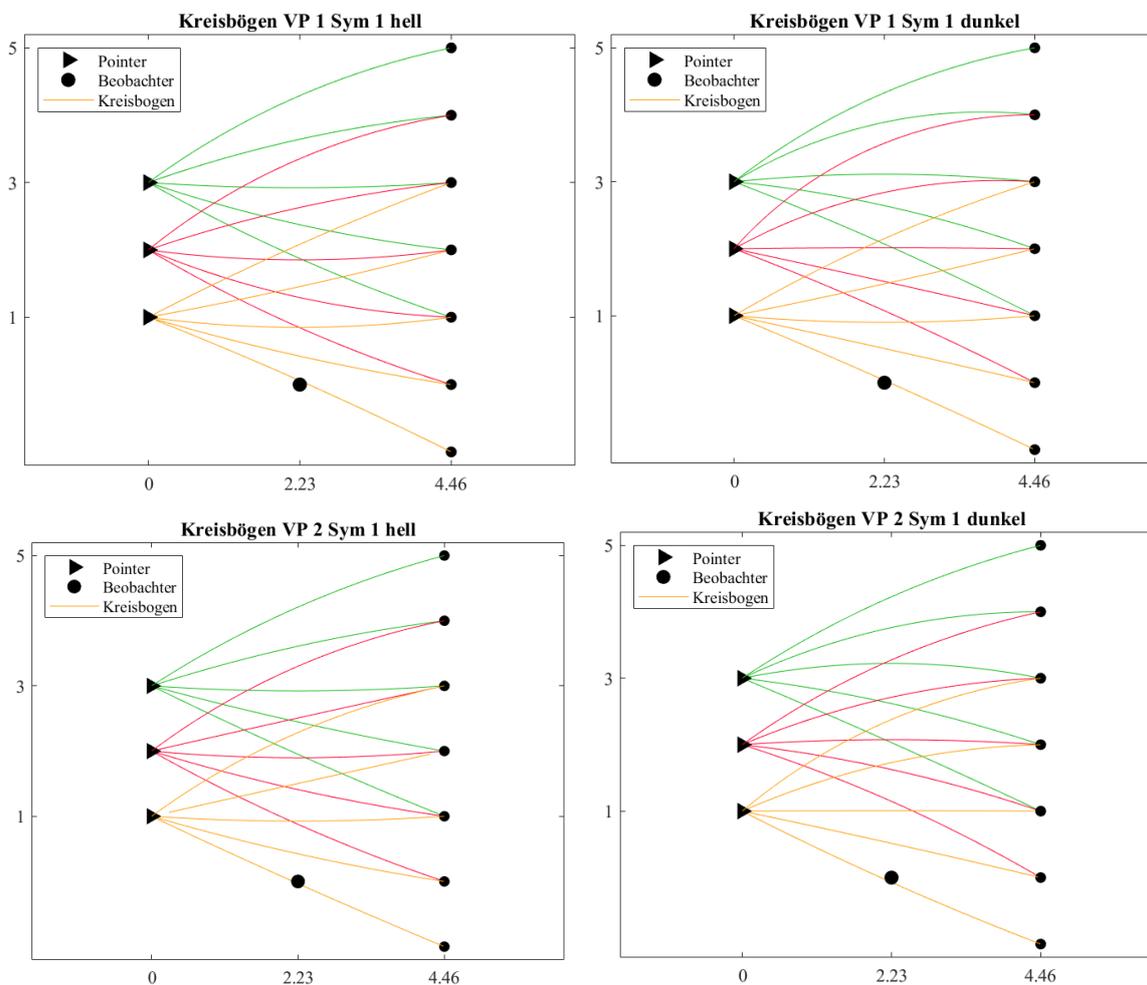
*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*



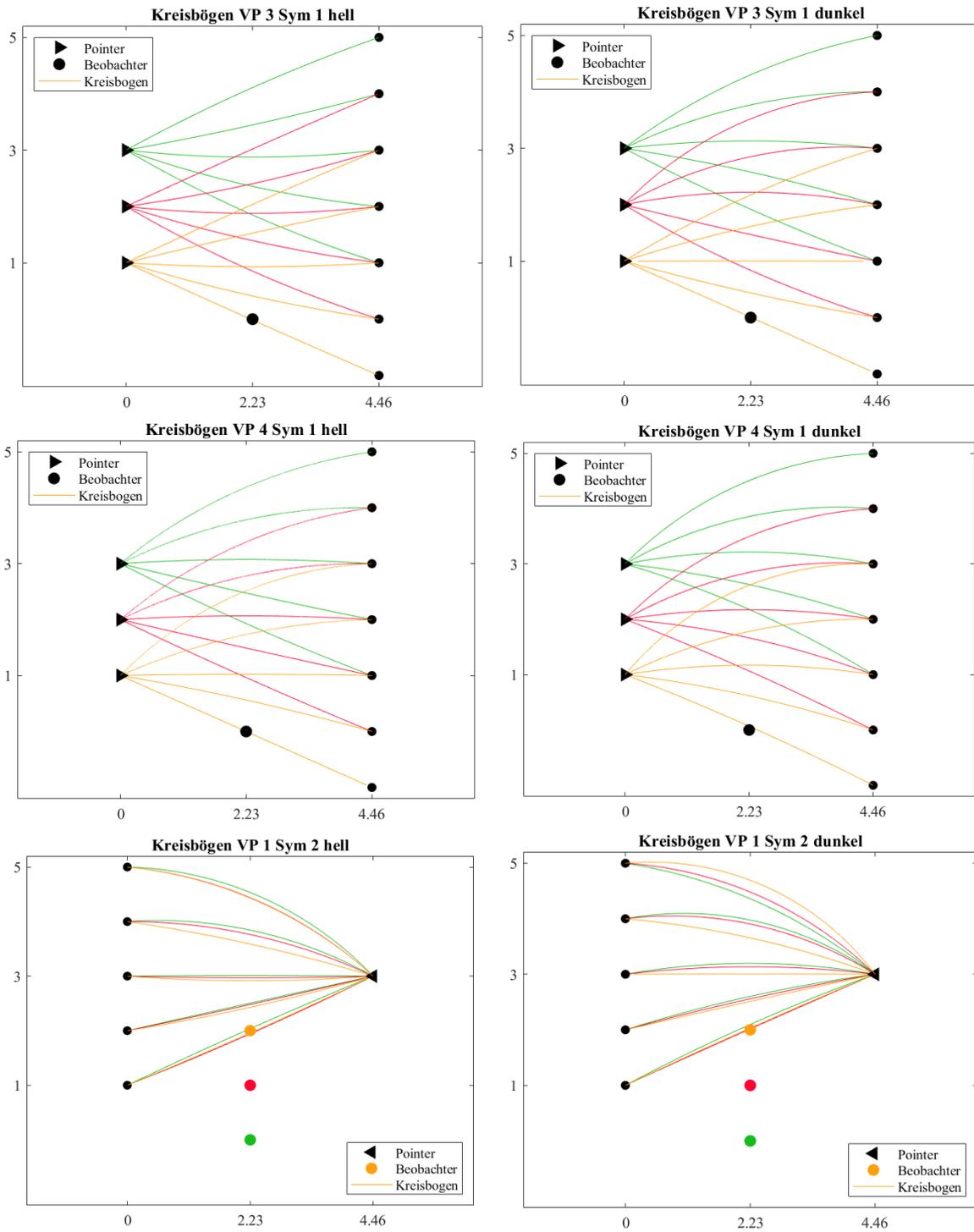
*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

Anhang c

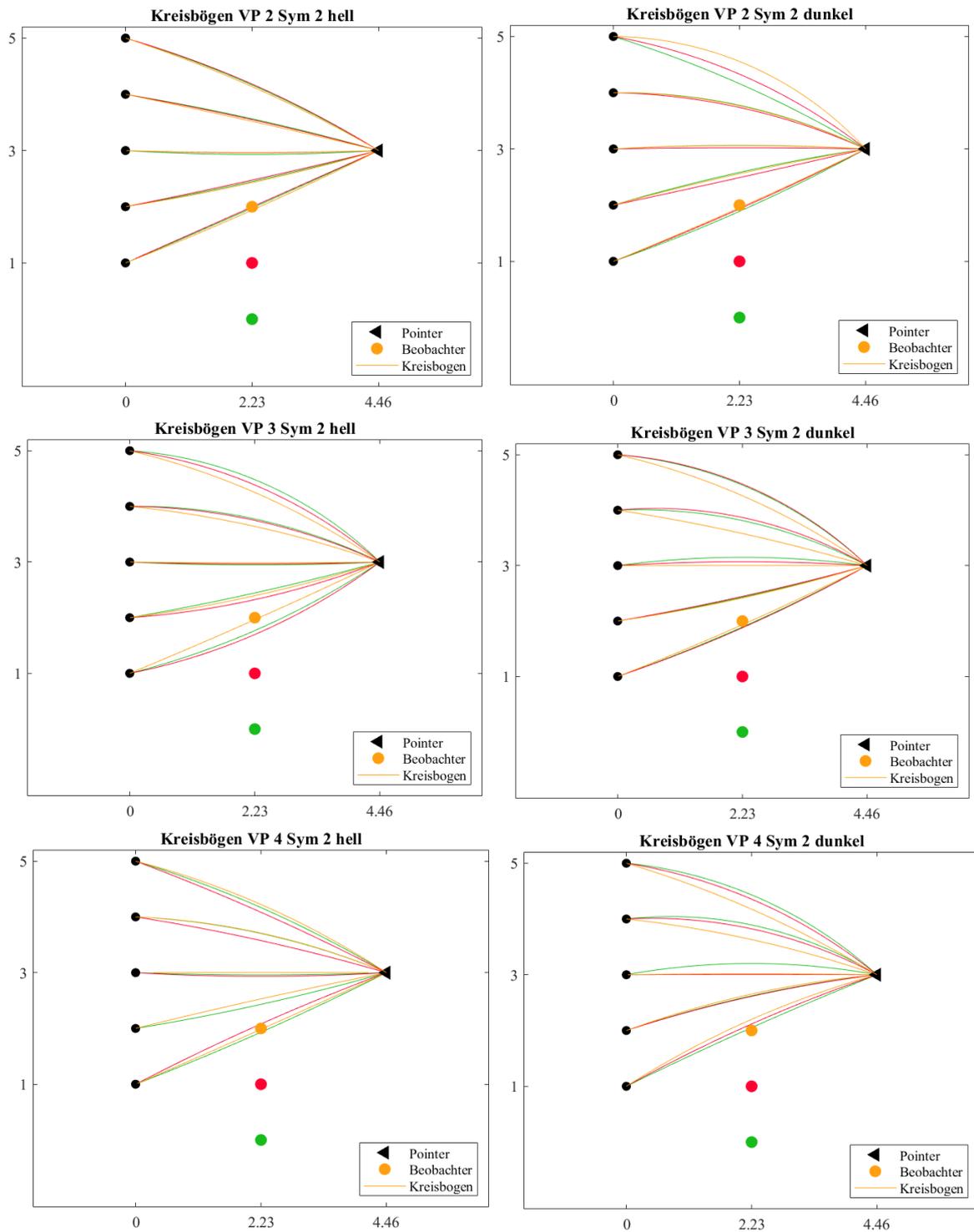
Kreisbogendarstellungen der Geodäten für alle Beobachter (VP 1 bis 4), für alle Helligkeitsbedingungen (hell versus dunkel) für beide Symmetriebedingungen („Sym 1“ versus „Sym 2“) und für alle Beobachter – und Targetpositionen. Die Targets sind als kleine schwarze Kreise dargestellt, der Beobachter als größerer schwarzer Kreis. Die verschiedenen Beobachterpositionen sind farblich markiert (Position 0 in grün, Position 1 in rot, Position 2 in orange). Bei der Hälfte der Plots wurde für die verschiedenen Positionen der Beobachter verschoben (dies entspricht dem tatsächlichen Versuchsaufbau). Bei der anderen Hälfte der Plots wurden für die verschiedenen Positionen der Pointer und die Targets verschoben, wobei der Beobachter an Position 0 fixiert wurde (dies entspricht *nicht* dem tatsächlichen Versuchsaufbau und wird nur aus anschauungsgründen so dargestellt). Die Distanzen (in m) entsprechen den Distanzen des echten Versuchsaufbaus.



*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*



*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*



*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich diese schriftliche Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet habe.

08.10.2020, Sindelfingen

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'T. Miller'.

Tabea Miller

*Exozentrisches Pointing im sichtbaren und abgedunkelten Innenraum –
Experimente zur intrinsischen Geometrie des visuellen Raumes*

ERKLÄRUNG

Exakte und unveränderte Ausdrücke der pdf-Datei werden nachgereicht, sobald es die vorherrschende Situation erlaubt (Copy-Shops geöffnet, keine Gefährdung, etc.).

Hinweis: Der Anhang der Bachelorarbeit wird sich nicht auf der ausgedruckten Version der Bachelorarbeit befinden, sondern nur auf der pdf-Version der CD.

08.10.2020, Sindelfingen

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'T. Miller', written in a cursive style.

Tabea Miller