



Titel:
**Der Einfluss von realistischen und
unrealistischen Schattierungen auf die
menschliche Tiefenwahrnehmung**

Thesis zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B. Sc.) im Studiengang Informatik

vorgelegt von

Matti Alexander Zinke

Technische Universität Berlin
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
Institut für Technische Informatik und Mikroelektronik

Abgabetermin: 15. März 2023

Erstgutachterin: Prof. Dr. Marianne Maertens

Technische Universität Berlin

FG Computational Psychology

Zweitgutachter: Prof. Dr. Marc Alexa

Betreut von Prof. Dr. Marianne Maertens und Dr. Guillermo Aguillar
Fachgebiet Computational Psychology

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den 9. März 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Zinke', written in a cursive style.

Matti Alexander Zinke - Unterschrift

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Fragestellung, inwiefern sich die Tiefenwahrnehmung einer Person ändert, wenn sie mit realistischen oder unrealistischen Schatten eingefärbte computergenerierte Landschaften untereinander vergleicht. Dazu wurde eine computergenerierte Landschaft auf sechs verschiedenen Skalierungsgraden gerendert und diese auf jeder Skalierung mit drei Schatten eingefärbt. Diese sind durch zwei reelle Lichtbedingungen und einer unrealistischen Lichtbedingung erzeugt. Elf Personen sollten für jeden möglichen Vergleich aller Schatten auf allen Skalierungen die Entscheidung treffen, welche Landschaft mehr Tiefe besitzt. Das Experiment wurde durch MLCM, sowie auch an der totalen Anzahl der Entscheidungen einer Testperson ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die einzelnen Personen eine favorisierte Lichtbedingung besitzen, aber je höher die Landschaft skaliert ist, desto ähnlicher ist die Darstellung von Tiefe aller Lichtbedingungen. Besonders das untersuchte diffuse Licht stellt für wenig skalierte Landschaften kaum Tiefe dar. Durch den Versuch lässt sich keine Präferenz von realistischem über unrealistischem Licht ableiten, sondern nur eine Präferenz von einer gerichteten Lichtquelle über einer diffusen Lichtquelle, besonders bei Landschaften ohne vieler Merkmale. Der Versuch kann in Zukunft mit einer besser eingestellten diffusen Lichtquelle sowie eventuell anderen Lichtbedingungen fortgeführt werden.

Abstract

The subject of this work is the research towards the question of whether people have a better perception of depth in a computer-generated landscape based on realistic or unrealistic shading. To research this, a landscape got generated on six different heights and three different lighting conditions each, which are made up of two realistic and one unrealistic lighting conditions. Eleven people now had the task to decide which picture has more depth for every picture pairing of the landscape. The experiment was analyzed based on MLCM and the total count of decisions of a certain picture pair made by the observer. The results show that every person has a preferred light source, but the higher the scaling of the landscape is, the lower the differences between the different lighting sources are. Especially the diffuse lighting does not provide a lot of depth on lower scaling degrees. Based on this experiment there are no preferences between realistic over unrealistic lighting in a computer-generated landscape, but rather for direct lighting over diffuse lighting in landscapes without many features. This experiment could be remade with a better integrated diffuse lighting source and the use of other lighting sources may also be researched.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Tiefenwahrnehmung des Menschen	1
1.2	Versuch von Schlütz	3
1.3	Vorbereitungen für den Versuch	4
1.3.1	Generierung der Reize	4
1.3.2	Pilotexperiment 1: Messung wahrgenommener Tiefe anhand des Vergleichs von Testpunkten im Relief	5
1.3.3	Pilotexperiment 2: Messung wahrgenommener Tiefe durch Schätzung der Höhe eines Testpunkts	8
1.3.4	Pilotexperiment 3: Vergleich der Höhe von verschiedenen Skalierungen der gleichen Landschaftsszene	9
1.4	Hypothesen	11
2	Versuch	12
2.1	Methode	12
2.2	Versuchspersonen	12
2.3	Apparat	12
2.4	Stimuli	12
2.5	Design	14
2.6	Durchführung	14
3	Auswertung	15
3.1	MLCM-Graphen	16
3.2	Heatmap	17
3.3	Durchschnittliche Antwortzeiten	18
3.4	Fragebogen	20
4	Diskussion	20
4.1	Ergebnisse der Auswertung	20
4.2	Probleme zu den Schatten	20
4.3	Probleme bei dem Versuchsaufbau und der Landschaft	21
4.4	Mögliche Änderungen des Versuchs	21
4.5	Auseinandersetzung mit den Hypothesen	21
4.6	Fazit	22
	Literaturverzeichnis	23
	Abbildungsverzeichnis	24
A	Anhang	26

Persönliches Vorwort

Zufälligerweise habe ich bei der Suche nach einem Thema für meine Bachelorarbeit die Arbeit von Schlütz gelesen. Das Thema fand ich zunächst etwas merkwürdig, als ich dann jedoch bemerkt hatte, worum es ging, war ich sehr fasziniert. Zuvor hatte ich mir noch nie Gedanken gemacht, wie genau Schatten auf einem Bildschirm dargestellt werden. Obwohl ich mich von klein auf sehr für Videospiele interessiere, bemerkt man in diesen selten wie die Schatten dargestellt werden. In den meisten Fällen sind Schatten auch nicht notwendig und ausschaltbar, die Erfahrung für den Spieler ist jedoch nicht scheinbar anders. Zudem gibt es heutzutage auch viele Filme, in denen die meisten Szenen gerendert sind. Ähnlich wie bei Videospiele, achtet man nicht wirklich darauf, wie die Schatten dargestellt sind. Sind diese dort jedoch nicht vorhanden, wirkt es aber schnell unnatürlich. Da ich später eventuell in der Computeranimation arbeiten möchte, fand ich es sehr interessant, wie dies am besten umgesetzt wird. In der echten Welt gibt es ständig überall Schatten und diese sind im Gegensatz zur virtuellen Welt nicht ausschaltbar. Je nach Wetterverhältnissen ändern sich die sichtbaren Schatten.

1 Einleitung

1.1 Tiefenwahrnehmung des Menschen

Als Grundlage meiner Untersuchungen habe ich mich zunächst einmal gefragt, wie genau ein Mensch Tiefe wahrnimmt. Laut Snowden, Thompsen und Troscianko (2012) gibt es dafür zuerst einmal das stereoskopische Sehen. Dies bedeutet kurz gesagt, dass ein Auge etwas anderes sieht als das andere. Dafür gibt es Zellen, die auf Unterschiede in den Bildern reagieren. Die nächste Art Tiefe wahrzunehmen ist die Bewegungsparallaxe. Diese ist beispielsweise erkennbar, wenn man in einem Zug sitzt und aus dem Fenster schaut. Alle Objekte, die nah liegen, wie die Schienen, bewegen sich schneller als Bäume und Berge im Hintergrund. Wenn nun die Bewegung dieser einzelnen Punkte berechnet wird, können wir jedem Punkt eine Tiefe zuordnen. Die Bewegungsparallaxe kann jedoch nur verwendet werden, wenn sich der Beobachter bewegt und nicht das betrachtete Objekt. Diese Art Tiefe zu berechnen wird ebenfalls in der Tierwelt verwendet. So bewegen Katzen ihren Kopf, bevor sie abspringen, um genau ihr Ziel zu erreichen. Die nächste Art Tiefe zu messen sind pictorial cues/ bildliche Hinweisreize. In einem Bild kann kein stereoskopisches Sehen verwendet werden, da ein flaches Bild keine reelle Tiefe besitzt. Die Parallaxe kann ebenfalls nicht verwendet werden. Hinweisreize, welche Informationen über Tiefe in einem statischen 2D Bild geben, werden bildliche Hinweisreize genannt.

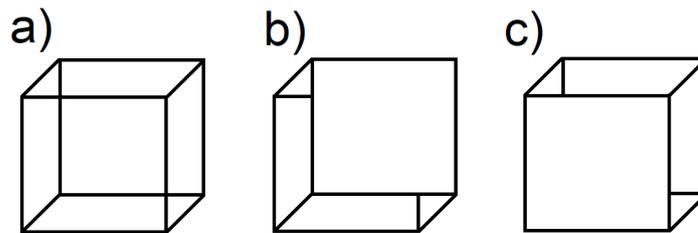


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt sogenannte Neckerwürfel. Diese zeigen, wie das Gehirn aus Linien drei-dimensionelle Objekte erzeugen möchte.

Der erste bildliche Hinweisreiz ist die Verdeckung, auch Interposition genannt. In der echten Welt, wenn sich ein Objekt hinter einem anderen befindet, dann wird ein Teil dieses Objektes verdeckt. Es ist einfacher Objekte im Vordergrund zu identifizieren, da diese Dinge hinter ihnen, die sich weiter weg befinden, verdecken. Ein gutes Beispiel für die Verdeckung sind sogenannte Necker-Würfel, welche in Abbildung 1 abgebildet sind. Je nachdem welche Teile des Würfels erkennbar sind, ist es entweder eindeutig oder mehrdeutig, wie der Würfel aussieht. In a) wirkt die Abbildung mehrdeutig. Es wird jedoch wie in b) und c) schnell ein dreidimensionelles Bild gesehen, obwohl es sich nur um eine flache hexagonale Fläche mit ein paar Linien darauf handelt. Das zeigt jedoch gut, wie entschlossen das menschliche Gehirn ist, 2D Bilder als 3D Objekte zu interpretieren. Als nächstes gibt es die Größen Hinweisreize. Diese beschreiben, je weiter ein Objekt entfernt ist, desto kleiner wird das Bild von diesem Objekt auf der Retina. Ein Beispiel dafür sind Schienen, die in größerer Entfernung verschwinden. Die Breite der Schienen wird dünner und somit auch das Bild der Schiene auf der Retina, je weiter sie entfernt sind. Dieser Hinweisreiz wird oft auch „lineare Perspektive“ genannt. Wenn wir die echte oder relative Größe eines Objekts kennen, können wir daraus einen Eindruck der Entfernung bekommen, je nachdem wie groß das Bild auf der Retina ist. Beinhaltet eine Szene viele Elemente in ziemlich gleicher Größe wie ein Maisfeld oder Kiesstrand, bekommt man einen sehr guten Eindruck von Tiefe. Das liegt daran, dass die einzelnen Elemente in der Distanz kleiner werden. Dies wird auch Textur Perspektive genannt. Für diese ist es nicht zwangsweise nötig, die tatsächliche Größe von Objekten zu kennen. Des Weiteren kann über die Luftperspektive Tiefe hinzugefügt werden.

Das visuelle System des Menschen benutzt zudem bereits vorhandenes Wissen über die

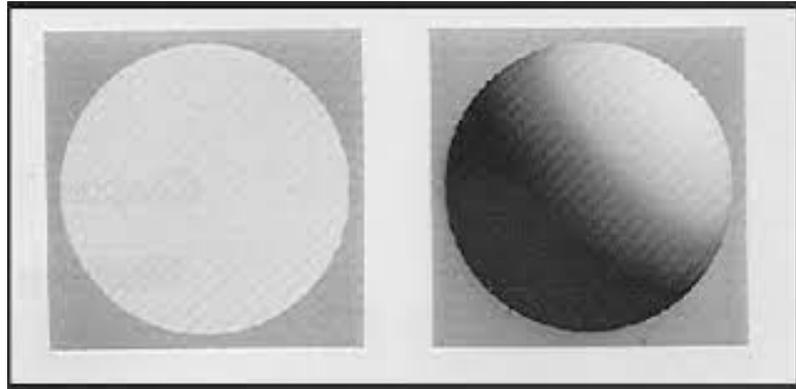


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt ein Beispiel von Shape of Shading. Im linken Bild ist nur ein 2D Kreis zu erkennen und mit einem Licht kann eine 3D Kugel erkannt werden. Die Abbildung wurde von http://www.cse.iitm.ac.in/~vplab/courses/CV_DIP/PDF/ShapeFromShading.pdf (zuletzt abgerufen am 10.02.2023) übernommen.

Umwelt, um aus einer Szene Informationen zu bekommen. Gerardin, de Montalembert und Mamassin (2007) erklären das mit dem "Shape-from-shading" Prinzip. Schlussfolgerungen durch Shape-from-shading kommen dadurch, dass Licht aus einer bestimmten Richtung kommt. Der Begriff „Shading“ bezieht sich auf das reflektierte Licht von Oberflächen, welches sich je nach Form verändert. Daraus entsteht der Begriff Shape-from-shading. Shading ist außerdem anders als Schatten. Der Begriff Schatten bezieht sich auf alle Teile einer Oberfläche, die kein Licht abbekommen aufgrund der Verdeckung eines anderen Objekts. Nun sind abgebildete Schatten ausschlaggebend für die Wahrnehmung von räumlicher Anordnung. Schatten, die sich an dem Objekt befinden, scheinen eher eine Rolle zu spielen als geworfene Schatten, da sie helfen die Form eines Objekts zu erkennen. Abbildung 2 zeigt ein einfaches Beispiel dafür. Im linken Bild ist einfach nur ein Kreis zu erkennen. Im rechten Bild wird aber durch ein Licht ein Schatten geworfen, wodurch die Form einer Kugel vermutet werden kann. Das Verstehen der Beleuchtung eines Bildes hilft für die Aufteilung der Szene in verschiedene Objekte und diese Szene wiederum in verschiedene Teile. Zudem kann das visuelle System des Menschen die Berechnung der Szene beschleunigen mit Hilfe von vorherigem Wissen über die Beleuchtung. Statistische Regularitäten der Umgebung werden ebenfalls genutzt, um eine Bildszene eindeutig zu verstehen. Eine dieser Regularitäten ist das Licht von oben. Jedoch scheint es so, dass es teils eine Bevorzugung gibt, wenn das Licht leicht von links kommt und nicht gerade von oben. Aber nicht nur die Richtung des Lichts hat eine starke Auswirkung auf die Wahrnehmung. Ramachandran und Kleffner (1992) fanden heraus, dass konkave Formen schneller zwischen konvexen Formen bemerkt werden, als andersherum. Vorherige Studien der beiden haben gezeigt, dass eine gedachte Lichtquellenposition die wahrgenommene Gestalt von Objekten beeinflusst. Dabei ist aber nicht klar, ob Objekte mit dieser bevorzugten Lichtquelle als besser wahrgenommen werden. Es stellt sich die Frage, ob Beobachter mehr sensitiv zu den Eigenschaften eines Objektes sind, wenn es mit einem bevorzugten Licht beleuchtet wird.

Bei dem Versuch von Schlütz (2020) kommen die bildlichen Hinreize zur Geltung, aber vor allem auch Shape-from-shading. Er hat nämlich computergenerierte Landschaften untersucht, welche einer Bergkette gleichen. Dadurch haben die Beobachter ein Gefühl von Tiefe in der Landschaft.

1.2 Versuch von Schlütz

Schlütz wollte mit seinem Versuch herausfinden, ob es Unterschiede in der Wahrnehmung von Tiefe auf einem Monitor oder mit einer VR-Brille gibt. Dafür hat er diese Landschaften mit realistischen und unrealistischen Schatten eingefärbt. Der Versuchsaufbau war so, dass er, wie Abbildung 3 zeigt, zwei Landschaften nebeneinander gelegt hat. Eine dieser Landschaften ist mit einer realistischen Schattierung und die andere mit einer unrealistischen Schattierung eingefärbt. Wie in der Abbildung 3 unten zu sehen, startet die Kamera senkrecht zur Landschaft, so dass beide Landschaften zum Start eines Durchlaufs gleich aussehen. Danach rotiert die Landschaft langsam und dadurch ändert sich auch der Kamerawinkel. Die Versuchsperson sollte nun so schnell wie möglich entscheiden, welche der beiden Landschaften richtig schattiert ist. Es gab nach einer Entscheidung kein Feedback. Anhand der Ergebnisse, ob es nun für den Versuch am Monitor oder der VR-Brille eine schnellere Reaktion gibt, begründet er sein Ergebnis. Zudem wurden 30 Landschaften zweier Arten untersucht, eine Hälfte mit stark ausgeprägtem Relief, also eine stärker skalierte Landschaft und die andere Hälfte mit weniger ausgeprägtem Relief, also weniger skalierte Landschaften. Nachdem einmal diese 30 Landschaften untersucht worden sind, wurde die andere Art untersucht. Ob mit dem Monitor oder der VR-Brille gestartet wurde, war zufällig. Es wurde auch die Augenbewegung getrackt.

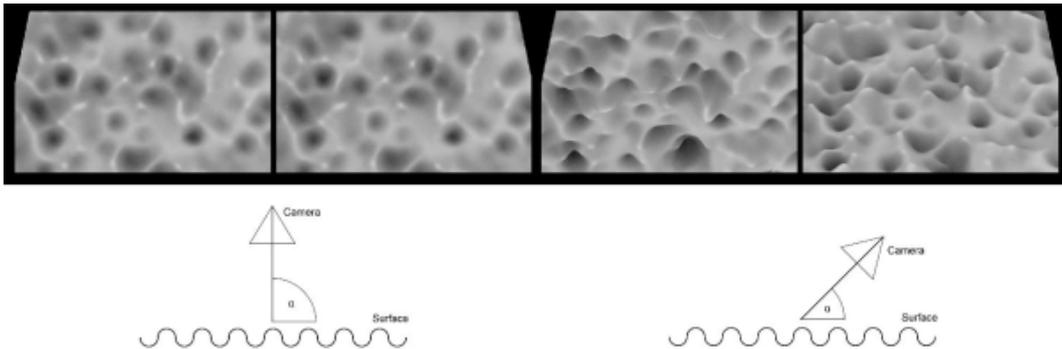


Abbildung 3: Versuchsdesign von Schlütz. Erst werden beide Stimuli in einem 90° Winkel von oben gezeigt, wodurch sie gleich aussehen. Bei 45% sehen die Landschaften jedoch anders aus.

Für die echten Schatten hat er ein Verfahren namens Ambient Occlusion verwendet. Zunächst wollte Schlütz für die unnatürlichen Schatten die invertierten Werte der Ambient Occlusion nehmen, aber die Schatten wirkten zu dunkel und künstlich. Um die Schatten für den Vergleich zu erzeugen, hat er danach probiert, die Schatten der Ambient Occlusion mit Filtern zu ändern. Letztendlich hat er wie auf der rechten Seite in Abbildung 3 zu sehen ist die Landschaft invertiert und auf diese die Schatten der normalen Ambient Occlusion implementiert. Dadurch sieht die Landschaft so aus, als wäre sie auf den Kopf gedreht.

Schlütz kam zu dem Ergebnis, dass es zwischen dem Versuch auf dem Monitor und mit der VR-Brille keine Unterschiede gibt.

Beim Lesen der Arbeit sind mir einige Aspekte aufgefallen, von denen ich glaube, dass sie für meine eigenen Stimuli in einem von mir erstellten Versuch relevant sein können:

1. Die Skalierung der Landschaften

Ich möchte wie Schlütz in seiner Arbeit Landschaften verwenden, um den Versuch durchzuführen. Ich denke diese eignen sich gut, da sie der Realität ähneln und wie Bilder aussehen könnten, die die Versuchspersonen schon einmal gesehen haben. Außerdem finde ich das Konzept, verschiedene Höhen zu untersuchen, gut. Dennoch möchte ich eher mehrere verschiedene Skalierungen untersuchen.

2. Die Organisation der Landschaftsszenerie

Bei der Wahl der Landschaft muss auf einige Aspekte geachtet werden. Es sollten genügend Merkmale im Bild vorhanden sein, damit man Vergleiche führen kann. Jedoch sollten es auch nicht zu viele Berge und Täler sein, da sonst die Versuchsperson verwirrt werden würde. Deshalb sollten auch einige flache Abschnitte vorhanden sein. Besonders der Vordergrund sollte flach sein, da ein am vorderen Bildrand vorhandener Berg unrealistisch wirkt, da dieser abgeschnitten ist. Vielleicht könnten die Landschaften auch eingefärbt werden, um noch realistischer zu wirken.

3. Die Schattierungen

Generell finde ich die Fragestellung, einen Versuch mit natürlichen und gefälschten Schatten zu untersuchen, sehr interessant. Jedoch will ich mich im Vergleich zu Schlütz nur auf diese Fragestellung konzentrieren und genauer untersuchen. Für die realistische Schattierung finde ich die Verwendung von Ambient Occlusion sehr gut gelungen. Die Schatten wirken im Versuch von Schlütz realistisch. Jedoch würde ich die unrealistische Schattierung anders gestalten. Wenn der Versuchsaufbau anders ist als im Experiment von Schlütz, ist sofort erkennbar, dass es nicht realistisch ist. Ich fände es interessanter Schattierungen zu untersuchen, welche zunächst realistisch wirken, jedoch bei genauerer Untersuchung nicht so existieren können.

4. Der Versuchsaufbau

Ich finde das Versuchsdesign von Schlütz etwas zu undurchsichtig und durch die Rotation etwas zu kompliziert. Deswegen will ich den Versuchsaufbau vereinfachen und auch für solche Art von Versuchen ein generelles Versuchsdesign erzeugen. Außerdem denke ich es reicht nur Versuche auf einem Monitor untersuchen, da dies genügend Daten für neue Erkenntnisse erzeugt.

1.3 Vorbereitungen für den Versuch

1.3.1 Generierung der Reize

Der Versuch basiert auf computergenerierten Landschaften. Diese habe ich mit Hilfe eines Pythonskriptes erstellt. Das gleiche Skript hatte Schlütz bereits in seiner Arbeit verwendet und ich habe es von Ihm bekommen. In dem Skript kann die Größe der Landschaft, die Anzahl der vorhandenen Punkte und die maximale Höhe geändert werden.

Nach mehreren Versuchen fand ich heraus, dass es besser ist, sehr stark skalierte Landschaften zu erstellen und diese danach weiter zu bearbeiten. Vor allem aus dem Grund, dass die Landschaft ansonsten zu dick wäre. Mit dem Skript erhält man .off Dateien, welche ich dann in Blender importieren konnte.

Blender ist eine 3D Creation Suite zum Modellieren, Animieren, Simulieren und Rendern. Es hat jedoch auch andere Funktionen (Blender homepage). Nativ können keine .off-Dateien in den Blender importiert werden, jedoch gibt es dafür Erweiterungen. In Blender habe ich mir zunächst mehrere Landschaften angesehen und überlegt, welche ich dann verwenden möchte. Das Skript erstellt die Landschaften komplett zufällig, weswegen ich jedes Mal die Landschaft in Blender genau anschauen musste. Bei der Auswahl der Landschaften für meinen Versuch habe ich darauf geachtet, dass der Vordergrund relativ gerade ist. Es sollten also keine Berge direkt im Bildvordergrund sein. Im Hintergrund war mir wichtig, keine abgeschnittenen Berge zu haben. Sonst wäre die Skalierung der Landschaft zu leicht zu unterscheiden. Bei der Skalierung der Landschaft spreche ich immer von der Skalierung der Höhe der Berge und der Tiefe der Täler. Außerdem legte ich Wert darauf, dass es mehrere Punkte in der Landschaft gibt, auf die sich eine Versuchsperson fixieren könnte.

Als nächstes habe ich die einzelnen Schatten auf den Landschaften hinzugefügt. Dafür habe ich Ambient Occlusion benutzt, welches in Blender integriert ist. Außerdem gibt es in Blender weitere Möglichkeiten, Schatten zu erstellen und zu importieren.

Ich habe mich bewusst für Ambient Occlusion entschieden, da im Versuch von Schlütz bereits Ambient Occlusion benutzt wurde und sehr realistisch wirkte. An den Einstellungen der Ambient Occlusion habe ich nichts geändert. Theoretisch könnten die Anzahl an simulierten Strahlen (traced rays) sowie auch die Farbe der Schatten verändert werden. Die Anzahl an Rays ändert das Bild kaum, erhöht aber stark die Renderzeit, weswegen ich den Standardwert von 16 gelassen habe. Die Farbe habe ich auch hier nicht geändert. Ich habe auch einen Farbregerler auf die Oberfläche der Landschaft gelegt. Mit diesem kann die Stärke der Schatten verändert werden, indem man die maximale Helligkeit verändert. Diese kann wie bei Abbildung 4A auf einen höheren Wert oder wie bei Abbildung 4B auf einen tieferen Wert gesetzt werden. Ambient Occlusion ist eine Technik zum Hinzufügen von Schatten auf diffusen Objekten, welche durch ein Umgebungslicht beleuchtet werden (Bunnell 2005). Es gibt keine direkte Lichtquelle, sondern eine diffuse, die alles gleich beleuchtet. Ohne Schatten sehen diffuse Objekte, welche von mehreren Richtungen beleuchtet werden, eher flach und unrealistisch aus.

Ambient Occlusion fügt nun weiche Schatten hinzu, indem Oberflächen abgedunkelt werden, die nur teilweise sichtbar sind. Dafür wird für jeden Punkt ein sogenannter Accessibility Value ausgerechnet. Dieser beschreibt die Prozentzahl der Hemisphäre über jedem Punkt, welche den untersuchten Punkt nicht bedeckt. Je mehr ein Punkt bedeckt ist, desto dunkler ist dieser.

Als nächstes habe ich probiert, eine Möglichkeit zu finden, unnatürliche Schatten zu erstellen. Zunächst habe ich versucht die durch Ambient Occlusion generierten Schatten einzufärben und dadurch unrealistischer zu machen, jedoch sehen diese dann zu unnatürlich aus. Deswegen bemühte ich mich, die Eigenschaften der Oberfläche zu verändern. Diese kann dadurch metallisch oder schimmernd gemacht bzw. mit einem Glanz versehen werden.

Das Verändern dieser Eigenschaften lässt die Oberfläche jedoch plastisch und unreal wirken. Bei Abbildung 5A habe ich einige Eigenschaften verändert, wodurch die Landschaft kaum noch Kontrast besitzt und die Entscheidungen erschwert werden. Teils können die Unterschiede in der Skalierung der Landschaft dann kaum noch erkannt werden. Wenn zum Beispiel die Oberfläche wie in Abbildung 5B metallisch aussieht, schimmert sie zu viel und wirkt nicht echt. Der Glanz hat auch eine größere Auswirkung, da dadurch besonders die Spitzen der Berge sowie die tiefsten Stellen in den Tälern hervorgehoben werden. Ich habe alle Eigenschaften auf dem Standardwert belassen, da es so am realistischsten aussieht und auf eine unrealistische Schattierung durch Blender verzichtet. Der Glanz liegt hier auf 0,5, wodurch es teils erkennbare Hervorhebungen gibt, es aber auch nicht zu leichte Entscheidungen gibt. Mehrere Lichtquellen gleichzeitig aus verschiedenen Richtungen hatten in meinen ersten Versuchen auch keinen guten Effekt, um eine unrealistische Schattierung zu erstellen.

Die Landschaften habe ich dann mit dem in Blender integrierten Cycles Renderer gerendert. Dieser ist besonders realitätsnah und für die Herstellung von professionellen Simulationen geeignet. Vor allem die flexible Schattierung macht ihn für Simulationen besonders geeignet. (Blender Wiki)

Ich musste aber die Eigenschaften von Cycles etwas ändern, da es sonst zu lang gedauert hätte, die einzelnen Bilder zu rendern. Durch Reduzierung der Anzahl an Lichtreflektionen konnte die Renderzeit ohne sichtbare Auswirkungen auf das gerenderte Bild stark verringert werden.

1.3.2 Pilotexperiment 1: Messung wahrgenommener Tiefe anhand des Vergleichs von Testpunkten im Relief

Beim Erzeugen der Landschaften und dem Einfärben mit Schatten ist mir klar geworden, dass ich zunächst die wahrgenommene Tiefe in einem realistisch eingefärbten Bild quantifizieren können musste. Bei diesem Experiment wurde eine große, quadratische Landschaft gezeigt. Auf dieser Landschaft werden dann drei Punkte eingefügt, ein Ankerpunkt und zwei weitere Vergleichspunkte. Abbildung 7 zeigt den Versuchsaufbau und Abbildung 6 das Experiment aus anderen Winkeln.

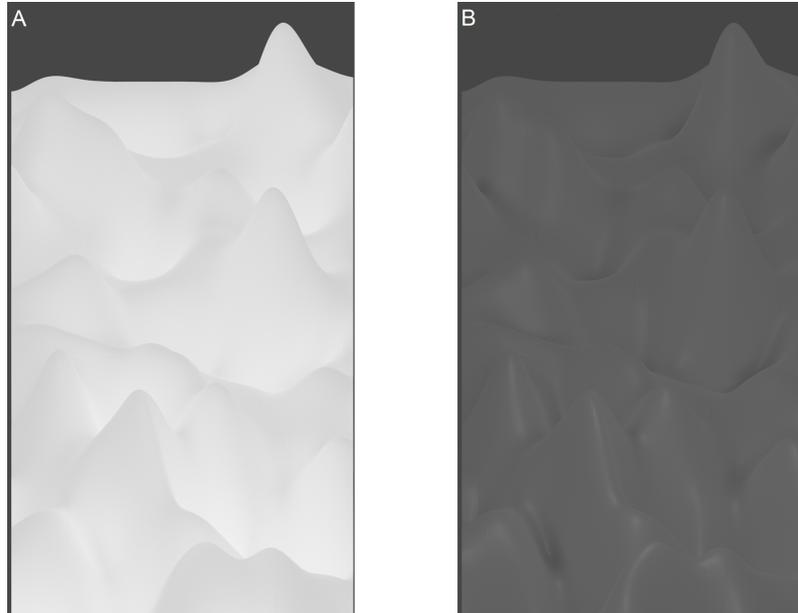


Abbildung 4: In Blender generierte Landschaften mit veränderten Farben der durch Ambient Occlusion erzeugten Schatten. A zeigt die Landschaft bei heller gestellten Schatten. B zeigt die Landschaft bei dunkler gestellten Schatten.

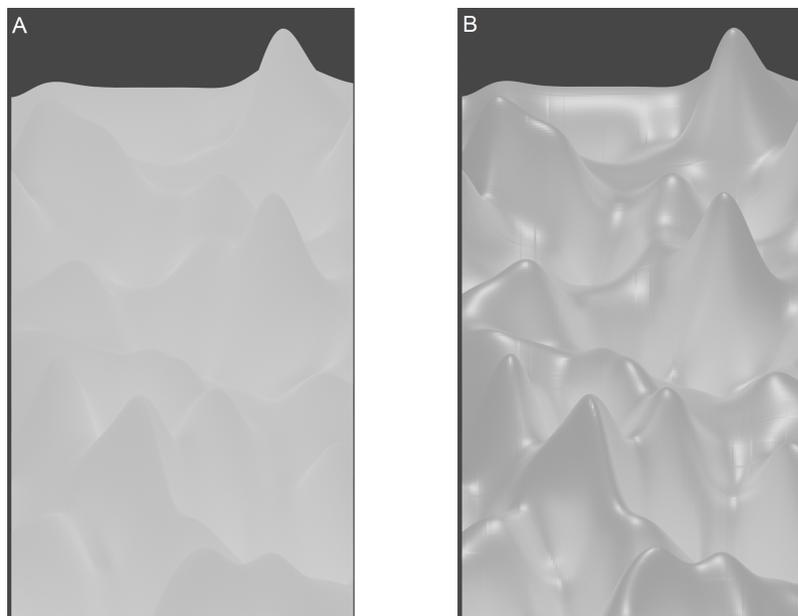


Abbildung 5: In Blender veränderte Oberflächen von Landschaften. Bei A wurden *Roughness*, *Sheen*, *Clearcoat* und *Transmission* in den Objekteigenschaften erhöht. Bei B wurden *Metallic*, *Sheen*, *Anisotropic* und *Transmission* erhöht.

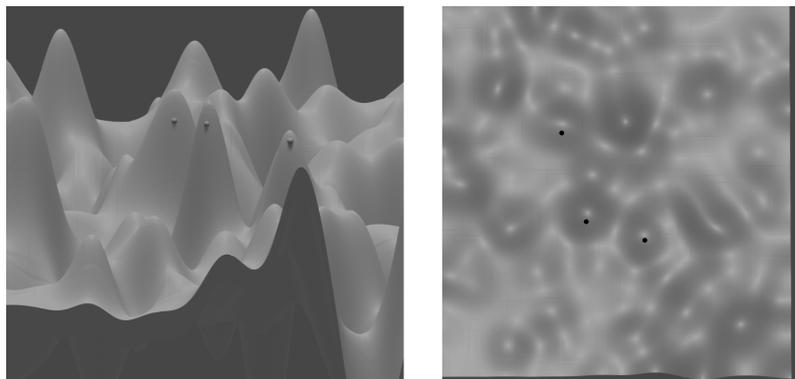


Abbildung 6: Zu sehen sind drei Punkte in einer Landschaft. Das linke Bild zeigt eine Ansicht von vorn und das rechte Bild eine Ansicht der Punkte von oben.

Die Aufgabe der Versuchsperson war es nun zu entscheiden, welche der beiden Punkte näher an die Höhe in der Landschaft des Vergleichspunkts herankommt. Mit der Höhe meine ich die absolute Höhe des Punktes in der dreidimensionalen Landschaft. Nach einer Entscheidung wird die Landschaft gewechselt oder auf derselben Landschaft teils neue Punkte gesetzt. Ein Versuch mit zwei Punkten hätte hier keinen Sinn gemacht, da man nicht viele Informationen gewinnen würde. Bei einem Selbstversuch sind mir einige Punkte klar geworden, die für den richtigen Versuch berücksichtigt werden müssen.

Zunächst beeinflusste der Blickwinkel die Entscheidung stark. Wenn der Winkel zu flach ist, sieht man leicht Unterschiede. Bei einem zu hohen Winkel kann man die Höhe der Punkte kaum erkennen. Es stellte sich nun die Frage, welcher Blickwinkel hierfür am besten geeignet ist. Zudem trat hierbei noch ein weiteres Problem auf. Ein Punkt sieht im Bild höher aus als der andere, obwohl es eigentlich entgegengesetzt ist. Das ist zum Beispiel im linken Bild von Abbildung 6 erkennbar. Die Punkte wirken dort als wären sie auf ähnlicher Höhe, jedoch sind der mittlere Punkt und der rechte Punkt viel höher als der linke Punkt. Der mittlere und rechte Punkt besitzen eine sehr ähnliche Höhe in der Landschaft. Ähnlich problematisch ist, dass Punkte im Bild sehr nahe aussehen, jedoch aber eigentlich in der generierten Landschaft weit voneinander entfernt sind. Der linke und mittlere Punkt wirken im linken Bild nah beieinander, jedoch ist der wirkliche Abstand größer als zu dem rechten Punkt. Dieser wirkt weiter weg, obwohl die Punkte die selbe Höhe im Bild besitzen.

Berge im Vordergrund würden außerdem den Versuch dadurch stark erschweren, da viel Fläche abgedeckt wird und man auch kein Verhältnis zur Höhe hat. Außerdem wusste ich nicht, inwiefern der Abstand zwischen den Punkten zum Versuchspunkt einen Einfluss auf die Wahrnehmung hat. Zudem ist es teils nicht möglich die Höhe richtig einzuschätzen, wenn die Punkte wie in Abbildung 7 weit auseinander sind, da zu viel auf der Landschaft passiert ist. Dadurch, dass viele Berge und Täler zwischen den Punkten sind, ist eine genaue Einschätzung nicht möglich. Die Perspektive bereitet zusätzlich Probleme. Ein weiterer Faktor, der die Entscheidung erschwert, ist die Position des Punktes relativ zum Berg. Der Punkt auf dem Berg hinten links in Abbildung 7 ist relativ zur maximalen Höhe des Berges tiefer gesetzt als bei den anderen Punkten. Dieser Punkt ist jedoch mit Abstand der höchste. Durch dieses Verfahren ist auch nicht genau einschätzbar, wie viel Einfluss nun Schatten auf das Versuchsergebnis hatten.

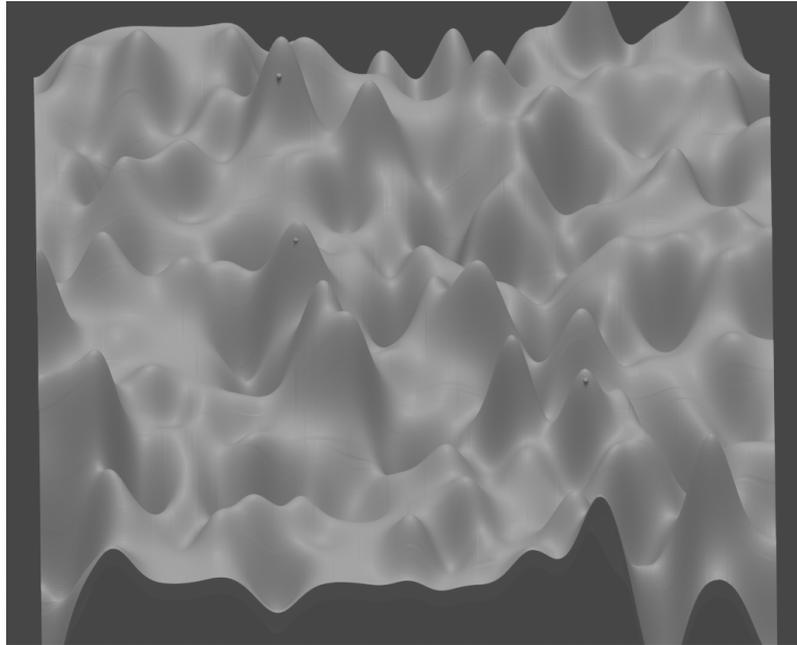


Abbildung 7: Bild einer Landschaft mit drei markierten Punkten. Der große Abstand und der Blickwinkel erschweren eine genaue Aussage.

1.3.3 Pilotexperiment 2: Messung wahrgenommener Tiefe durch Schätzung der Höhe eines Testpunkts

Aufgrund dieser ganzen Fragen und gewonnenen Erkenntnisse habe ich ein zweites Experiment durchgeführt. Ich bin bei dem Ansatz geblieben Punkte zu verwenden, habe jedoch den Aufbau geändert. Die Landschaft wurde in Blender zurechtgeschnitten. Die gleiche Landschaft wurde in einen niedrig skalierten und somit ziemlich flachen Teil aufgeteilt, einen mittelmäßig skalierten und einen stark skalierten Teil. Dort habe ich auf einer imaginären horizontalen Linie pro Abschnitt 7-8 Punkte gelegt. Die Aufgabe der Versuchsperson war es hier nun, die Höhe des angezeigten Punktes in der Landschaft zu schätzen.

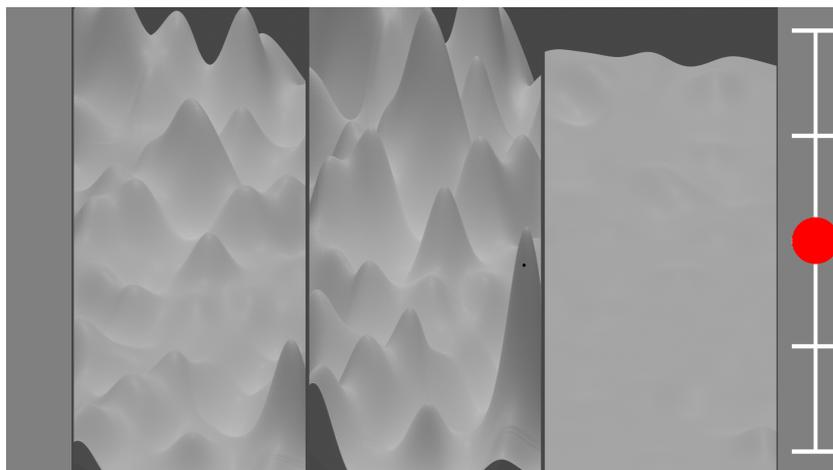


Abbildung 8: Versuchsaufbau des zweiten Versuches. Die Höhe des schwarz markierten Punktes sollte mit dem Regeler auf der rechten Seite ausgewählt werden.

Dafür gab es an der Seite einen Slider. Dieser hatte jedoch keine genaue Skalierung gegeben. Es gab nur sehr ungenaue Markierungen für die Zwischenschritte und keine genaue Angabe für das Maximum und das Minimum. Ob der höchste Punkt nun der höchste im Bildausschnitt oder in der gesamten Landschaft ist, war der Versuchsperson selbst überlassen. Es gab auch eine Markierung in der Mitte. Diese bedeutet die Höhe 0. Demnach wären bei der wenig skalierten Landschaft fast alle Punkte in der Nähe der Mitte der Skala. In Abbildung 8 ist das zu sehen, was die Versuchsperson bei diesem Pilotexperiment gesehen hätte. Nachdem auf einer Landschaft viele Punkte untersucht wurden, wird die nächste Landschaft betrachtet. Die Reihenfolgen der tiefen, mittleren und hohen Landschaften sind randomisiert. Die Idee hinter diesem Versuchsdesign war, die Probleme aus dem letzten Versuch zu beheben. Man sollte immer nur einen Punkt gleichzeitig sehen und somit zu keinen Problemen in der Distanz zwischen den Punkten kommen. Durch die Skala wird dieses Problem gelöst. Die Punkte sind auf der 2D-Ebene immer auf einer Linie. In der 3D-Landschaft besitzen die Punkte verschiedene Höhen, da sie in der Bildtiefe sowie auch in der Höhe in der Landschaft verschieden sind. Diesen Versuch habe ich in PsychoPy umgesetzt.

PsychoPy ist eine Anwendung für die Erstellung von Experimenten in der Verhaltenswissenschaft (Peirce et al. 2019). Auszeichnend sind die präzise Kontrolle und das Timing des Versuches und einzelner Stimuli. Durch PsychoPy lassen sich leicht ein Interface sowie ein Versuch erstellen. Wenn gewünscht, können diese auch in Python bearbeitet werden. PsychoPy kann automatisch Versuche randomisieren und deren Reihenfolge speichern. Zusätzlich werden auch die Entscheidungen und Reaktionszeiten gespeichert. Als ich selbst diesen Versuch durchgeführt habe ist mir aufgefallen, dass die Bewertung mit der Skala zu schwierig und subjektiv ist, wodurch ich eine erneute Veränderung vornahm.

1.3.4 Pilotexperiment 3: Vergleich der Höhe von verschiedenen Skalierungen der gleichen Landschaftsszene

Für einen besseren Versuchsaufbau habe ich mich von der Untersuchung einzelner Punkte wegbewegt und für einen neuen Ansatz entschieden. Im nächsten Experiment habe ich für das Design MLDS verwendet. MLDS steht für „Maximum Likelihood Difference Scaling“ und wird dafür benutzt, wahrnehmbare Differenzen, die leicht unterscheidbar sind, darzustellen (Knoblauch und Maloney 2012). Seit der Erstellung dieses Verfahrens hat es viel Anklang in der Psychophysik gefunden. Das Hauptproblem in der Skalierung ist es, eine Methode zu finden, die die Entscheidungen in eine numerische Form bringt. Nur so können diese zusammengefasst und analysiert werden. Normalerweise ist es für die Versuchsperson einfach, Stimuli anhand einer Aufgabe anzuordnen. Es ist jedoch nicht leicht einzuschätzen, wie stark diese Stimuli skaliert sind und die Unterschiede zu anderen darzustellen. Die Versuchsperson trifft zwar Entscheidungen, diese sind jedoch meistens nicht wiederholbar oder zu ungenau. Dafür wurde das Difference Scaling entwickelt.

Das Ziel des Difference Scalings laut Knoblauch und Maloney (2012) ist es, eine Skala zu erstellen, welche die wahrgenommenen Unterschiede zwischen den einzelnen Stimuli darstellt. Das bedeutet, dass A nicht nur skaliert ist als B, sondern auch ob der Unterschied zwischen A und B größer ist als der zwischen C und D. MLDS ist nun eine Weiterentwicklung davon, zum Schätzen von einzelnen Parametern auf der physischen Skala. Ein MLDS Experiment kann mit zwei Paaren von Stimuli (Quadrupel) oder drei Stimuli (Triaden) durchgeführt werden.

Ich habe MLDS gewählt, da dadurch die Versuchsdurchführung vereinfacht und die Datensammlung beschleunigt wurde. Dazu habe ich mir auch überlegt, die unrealistischen Schatten wieder wie ursprünglich gedacht einzubauen. Dafür habe ich dann in Blender mit einer anderen Lichtquelle noch weitere Bilder gerendert. Diese Lichtquelle leuchtet von vorn, aus der Richtung des Blickwinkels des Beobachters, über die Landschaft hinweg.

Ambient Occlusion kommt bei diesem Licht nicht mehr viel zum Einsatz, da dieses nur bei diffusem Licht funktioniert. Deshalb wurde generell durch Ambient Occlusion die Landschaft leicht eingefärbt und mit dem Lichtschein vom gerichteten Licht erzeugten Schatten

zusammengefügt. Zusätzlich habe ich noch eine dritte Schattenbedingung eingefügt. Dabei wurden die Bilder von dem gerichteten Licht genommen und in Gimp die Farben invertiert. Dadurch sieht es aus, als wenn ein Licht von hinter der Landschaft nach vorn scheinen würde. Man kann jedoch einen hellen Schein über den Bergspitzen erkennen, der durch ein solches Licht nicht erscheinen würde. Diese dritte Bedingung stellt nun meine unrealistische Schattenbedingung dar.

Durch MLDS konnte der Unterschied zwischen den einzelnen Schatten auch mehr verglichen werden. Ich hatte für alle drei Schattenbedingungen dieselben Abstufungen gerendert, von fast komplett flach bis sehr stark skaliert. Der Versuch lief so ab, dass wie in Abbildung 9 immer drei Landschaften nebeneinander gezeigt wurden, aber immer mit der selben Schattierung. Das Bild in der Mitte war immer in der Skalierung zwischen den anderen beiden. Die Testperson musste nun entscheiden, ob im Vergleich zum mittleren Bild nun das linke oder rechte Bild mehr Unterschied aufwies. Es wurden alle Bilder mit demselben Schatten miteinander verglichen und diese Vergleiche wurden fünf Mal wiederholt. Bei jedem Versuch ist es zufällig, in welcher Reihenfolge die Vergleiche erscheinen und welches der beiden Bilder links und welches rechts ist. Jeder Durchlauf meines Selbstexperiments dauerte circa 20 Minuten.

Zusätzlich haben die Versuchspersonen für den Versuch eine Augenklappe aufgesetzt, damit sie nur mit einem Auge sehen können. Durch die Augenklappe wird das stereoskopische Sehen gestört, wodurch die Tiefenwahrnehmung erschwert wird. Zudem wird nun mehr auf andere Arten Tiefe wahrzunehmen geachtet. Der Bildschirm ist ein zweidimensionales Bild, aber wird durch bildliche Hinweisreize dreidimensional wahrgenommen. Dadurch wirken die Landschaften realistischer. Um nun herauszufinden, welches Auge verdeckt werden soll, habe ich den Miles ABC-Test in einer leicht veränderten Variante verwendet, wie dieser bei Valle-Inclan et al. (2008) erwähnt wird. Dabei visiert die Testperson mit einem aus den Daumen und Zeigefingern gebildeten Dreieck einen Gegenstand in der Ferne an. Nun schließt sie abwechselnd die Augen und sagt, mit welchem Auge sie den Gegenstand noch sehen kann.

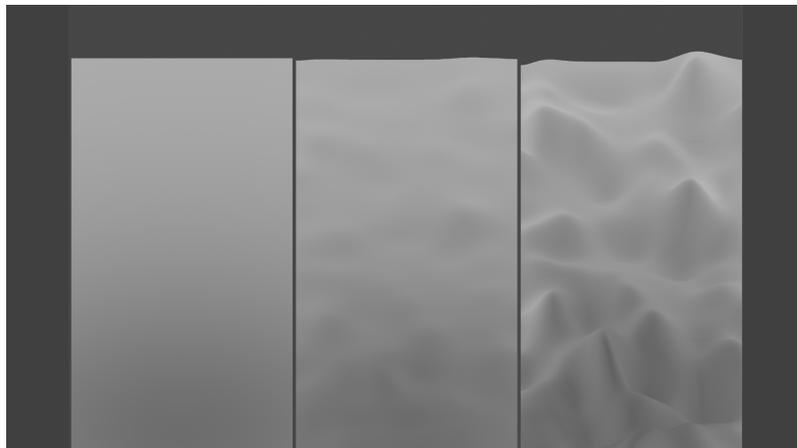


Abbildung 9: Drei verschieden skalierte Landschaften unter dem editierten Licht. Die linke Landschaft besitzt eine Skalierung von 0%, die mittlere Landschaft eine von 5% und die rechte Landschaft eine Skalierung von 25%. Die Aufgabe der Testperson ist es, zu entscheiden, welches der beiden Bilder einen größeren Unterschied zum mittleren Bild besitzt.

Nach dem Selbstexperiment waren mir jedoch wieder einige Probleme aufgefallen. Ein Durchlauf ist mit 20 Minuten relativ lang, wodurch man sich zum Ende des Versuchs nicht mehr komplett konzentrieren kann. Eine weitere Schwierigkeit bestand darin, dass fünf Durchläufe nicht ausreichend viele Daten geben. Die Anzahl hätte eigentlich verdoppelt werden müssen. Ein größeres Problem waren jedoch die Entscheidungen selbst. Es kann

zum Beispiel wie in Abbildung 10 sein, dass das Bild in der Mitte eine Skalierung von 30% hat, rechts 15% und links 50%. Nun ist der totale Unterschied zwischen 30% und 50% größer als der Unterschied zwischen 15% und 30%, aber relativ gesehen ist es umgekehrt. Welches Bild höher wirkt hängt von dem Beobachter ab, aber welche der beiden Antworten ist nun richtig? In den Bildern ist zwischen 30% und 50% der Höhenunterschied der Berge größer als bei 15% und 30%. Beide Entscheidungen wären auf eine Art und Weise korrekt, aber welche die Versuchsperson nimmt ist nun nicht eindeutig. Dies macht einige Vergleiche nochmals

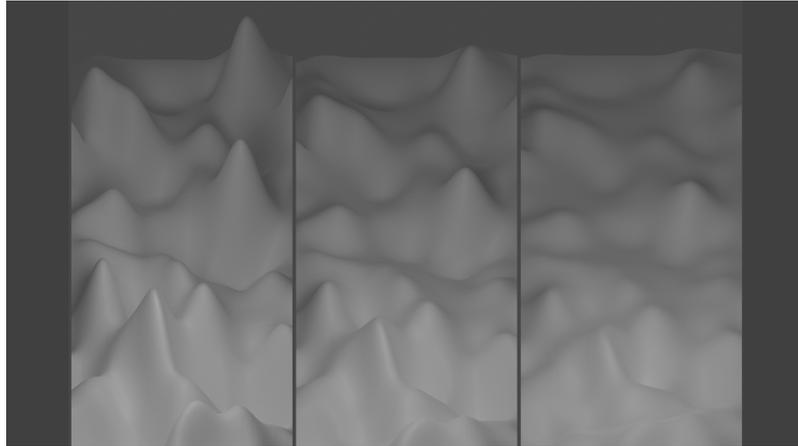


Abbildung 10: Beispiel eines weiteren MLDS Versuchs unter dem gerichteten Licht. Die linke Landschaft besitzt eine Skalierung von 50%, die mittlere Landschaft von 30% und die rechte Landschaft eine Skalierung von 15%.

viel schwerer. Ab einer Skalierung von circa 20% der original generierten Landschaft ist der Unterschied zwischen den Abstufungen auch sehr leicht erkennbar. Die Methode dieses Versuchs erfordert sehr viele Vergleiche, welche nicht zu leicht oder zu schwer sein sollten. Das heißt, zwei aufeinanderfolgende Höhenskalierungen sollen gerade noch unterscheidbar sein. Daher habe ich mich in meinem finalen Experiment dafür entschieden, die Skalierung der Landschaft zu variieren. Der Bereich wird begrenzt und auch nur eine Landschaft untersucht.

1.4 Hypothesen

Für das Experiment habe ich mir drei Hypothesen überlegt.

1. *Echte Schattenbedingungen sind besser unterscheidbar als unrealistische Schattenbedingungen.*
Ich denke, dass der Mensch diese Lichtverhältnisse kennt und sie dadurch präferiert werden. Außerdem, wenn die Tiefenwahrnehmung vom Realismus der gezeigten Schatten abhängt, sollte es Unterschiede bei den Ergebnissen der realistischen und unrealistischen Lichtbedingungen und deren erzeugten Schatten geben.
2. *Bei den flachen Landschaften kommt es häufiger zu Fehlern.*
Die flachen Landschaften besitzen weniger sichtbare Unterschiede und auch weniger Unterschiede in der Skalierung, wodurch sie ähnlicher zueinander sind. Besonders die diffuse Schattenbedingung sieht sehr hell aus, wodurch die Unterschiede in der Skalierung schlechter erkennbar sind. Wenn es weniger Skalierung in der Landschaft gibt, unterscheiden sich die realistischen Schatten von den unrealistischen Schatten weniger, wodurch die Ergebnisse verfälscht werden können. Dadurch wird es meiner Meinung nach in dem Vergleich mit dieser Bedingung mehr Fehler geben.
3. *Die Testpersonen werden alle die gleiche Wahrnehmung haben.*

2 Versuch

2.1 Methode

Um diesen Problemen aus dem Weg zu gehen, habe ich nun einen finalen Versuch gestartet. Hierbei habe ich erneut den Versuchsaufbau und die Durchführung geändert. Es wurde nun ein MLCM-Experiment durchgeführt. MLCM (Maximum Likelihood Conjoint Measurement), welches ebenfalls durch Knoblauch und Maloney (2012) entwickelt wurde, basiert auf den gleichen Grundlagen wie MLDS. Es gibt jedoch den Unterschied durch das Verwenden von Conjoint Measurement. Dieses erlaubt es, im Gegensatz zu MLDS, auf psychophysischen Skalen mehrere Unterschiede zu untersuchen. Das wäre theoretisch auch mit Difference Scaling möglich, jedoch ist es ein viel größerer Aufwand. Es muss auch, wenn die Datenreihen unterschiedlich sind, ermittelt werden, wie die Unterschiede die einzelnen Variablen beeinträchtigen. Durch Conjoint Measurement ist dieses Problem einfacher lösbar. Zu dem kann MLCM erfolgreich bei einer großen Anzahl an Stimuli benutzt werden, selbst wenn Vergleiche zwischen allen Stimuli erlaubt sind.

Bei diesem Experiment werden nur zwei Bilder miteinander verglichen. Die Versuchspersonen entscheiden nach der Frage „welche Landschaft ist mehr skaliert?“. Der Vorteil meines Experimentes mit MLCM ist, dass ich schneller mehr Daten sammeln kann. Zudem ist ein MLCM Experiment leichter durchführbar als ein MLDS Experiment. Die Skalierung habe ich ebenfalls auf einen kleinen Raum beschränkt. Von dem zuvor maximal skalierten Bild gibt es nun nur noch eine Höhe bis 30%, da bis zu diesem Wert die Änderungen der Skalierung pro Prozentzahl noch kleiner sind. Ich benutze nur noch eine Landschaft, wodurch der Versuch schneller absolviert werden kann. Außerdem bin ich mir nicht sicher, ob es sinnvoll wäre, durch eine zweite Landschaft und daraus folgende verdoppelte Versuchszeit mehr Daten zu bekommen. Es sollten auch nicht weniger Abstufungen untersucht werden, da die Anzahl sonst zu klein ist. Problematisch ist auch, dass die Zusammenhänge zwischen den Landschaften nicht bekannt sind. Ein Unterschied könnte tatsächlich durch die Landschaft begründet sein, aber auch durch eine andere, nicht vorhersehbare Variable. Demnach würde es mehr Sinn machen, nicht nur zwei Landschaften zu überprüfen, sondern mehrere auf einmal. Das würde jedoch das Experiment stark verlängern. Das Ziel war, die Versuche zeitlich und inhaltlich so zu gestalten, dass es genügend Informationen und Erkenntnisse gibt.

2.2 Versuchspersonen

Den Versuch haben 11 Testpersonen durchgeführt. Die Testpersonen sind Freunde, die jedoch vorab keinerlei Informationen über den Versuch hatten. Sowohl Männer als auch Frauen im Alter von 20-35 Jahren haben teilgenommen. Fast alle Testpersonen sitzen häufig vor einem Computer. Die Teilnehmer haben eine normale oder angepasste Sehkraft, sie erhielten eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 10,-€.

2.3 Apparat

Das Experiment wurde in einem abgedunkelten Raum durchgeführt. Die Testpersonen saßen im Abstand von einem Meter zum Monitor. Um eine aufrechte Sitzhaltung und stets den gleichen Abstand zu gewährleisten, wurde eine Kopfstütze montiert. Der Monitor ist der ViewPixx 3D/Lite. Die Auflösung des Monitors beträgt 1920x1080 Pixel. Die Bildschirmdiagonale beträgt 24 Inches und der Monitor besitzt einen Pixelpitch von 0,2715mm x 0,2715mm. Die Bildwiederholungsrate des Monitors beträgt 120 Hertz und die Helligkeit 250 cd/m² im Standardmodus des Monitors. (Anleitung des Monitors)

2.4 Stimuli

Die Stimuli sind 3D generierte Oberflächen. Diese bestehen aus einem Netz von 1.500.000 Knoten und 4.499.982 Kanten. Die Generierung ist zufällig und enthält Hügel und Täler. Bei

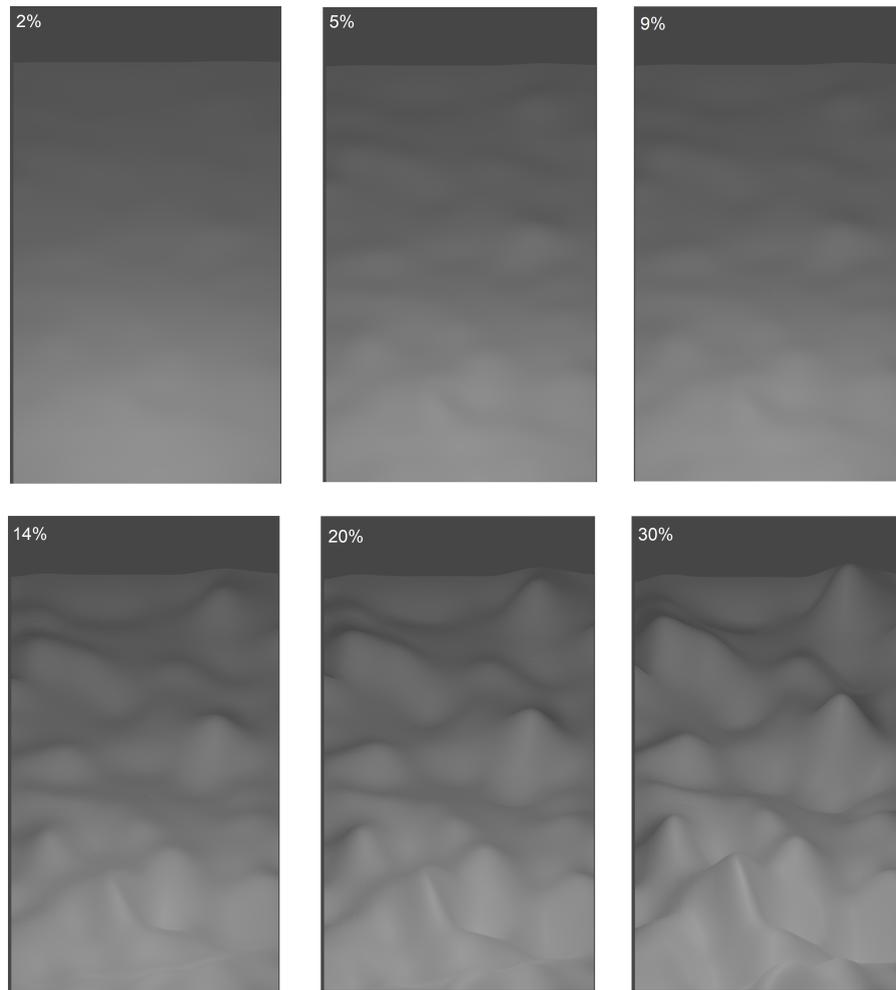


Abbildung 11: Alle Skalierungen für das von vorn aus gerichtete Licht. Es fängt mit 2% Skalierung an und endet bei 30%.

der Auswahl der Landschaft habe ich einige Faktoren beachtet. Einerseits sollten sich keine hohen Berge im Vordergrund befinden, da diese sonst das Bild verdecken und den Versuch zu leicht für die Versuchsperson machen. Zusätzlich habe ich darauf geachtet, dass keine Berge vom Bildende abgeschnitten werden. Weiterhin wurde eine Landschaft gewählt, bei der keine zu leichten erkennbaren Unterschiede existieren, wie zum Beispiel ein zu hoher Berg oder zu tiefe Täler. Wichtig war für mich auch, dass die Landschaften durch mehrere Merkmale betrachtbar sind. Durch die Unterschiede wird erreicht, dass nicht alle Testpersonen auf dieselbe Stelle im Bild schauen.

Die Stimuli wurden in Blender mit dem Cycles Renderer gerendert. Es wird nur eine Landschaft verwendet, die jedoch verschiedenen skaliert ist.

Es gibt sechs Abstufungen: 2%, 5%, 9%, 14%, 20% und 30% von dem ursprünglich generierten Bild. Diese sind auch in Abbildung 11 abgebildet. Die Landschaften sind so gewählt, dass bei einer normalen Skala leichte Unterschiede erkennbar sind. Besonders bei den flachsten Skalierungen wird die Schwierigkeit erhöht. Die Kamera für den Renderer steht in einem Winkel von 45° zur Landschaft und in größerer Entfernung von der Oberfläche.

Durch Blender wurden Schatten hinzugefügt. Beispiele für die Schatten auf einer Skalierung von 2% der Originallandschaft gibt es in Abbildung 12 und auf 20% in Abbildung 13. Die erste untersuchte Schattenbedingung ist eine gerichtete Lichtquelle.

Diese scheint von hinter der Kamera auf die Landschaft in einem 120° Winkel. Dabei handelt es sich um ein Flächenlicht in der Breite der Landschaft, die Höhe des Lichts ist genauso hoch wie die Breite. Dieses Licht besitzt demnach die Ausmaße $100\text{m} \times 100\text{m}$ in Blender und eine Helligkeit von 150000 Watt und ist nicht von Ambient Occlusion betroffen, da es sich nicht um ein diffuses Licht handelt.

Die zweite Schattenbedingung ist ein diffuses Licht, wie Sonnenstrahlen bei Wolken am Himmel. Diese Schatten wurden mit Hilfe von Ambient Occlusion in die Landschaft eingefügt. Die Einstellungen an der Ambient Occlusion und der Oberfläche sind Standardinstellungen von Blender. Jedoch habe ich die Eigenschaften des Sonnenlichts verändert. Die Sonne in Blender ist in der Mitte der Landschaft in großer Höhe positioniert und die Helligkeit auf $1 \text{ Watt}/\text{m}^2$ fixiert.

Für die letzte Schattenbedingung habe ich die Farben der Bilder vom gerichteten Licht in Gimp invertiert. Zusätzlich habe ich die Farben vom Hintergrund angepasst, so dass dieser dem der anderen generierten Bilder gleicht. Dadurch entsteht ein Bild, welches die Wahrnehmung erzeugt, dass das Licht von hinten nach vorn scheint. Jedoch gibt es einige nicht realistische Effekte. Zum Beispiel nimmt man ein Leuchten um die Bergspitzen herum wahr.

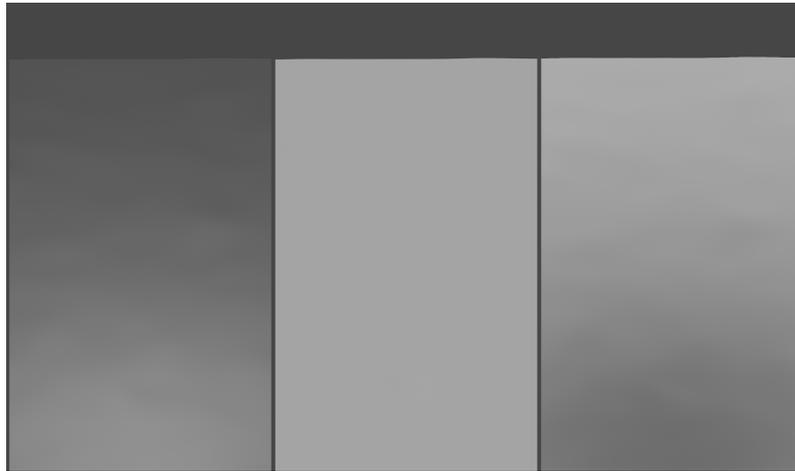


Abbildung 12: Vergleich der Schattenbedingungen bei einer Skalierung von 2%. Links ist das gerichtete Licht, in der Mitte das diffuse Licht und rechts das bearbeitete Licht.

2.5 Design

Der Versuch wurde mit MLCM designt. Dementsprechend gibt es zwei Stimuli, die nebeneinander angeordnet sind. Einen Vergleich wie die Versuchsperson ihn gesehen hat ist in Abbildung 14 zu sehen. Es gab insgesamt 18 Stimuli und jedes wurden mit jedem verglichen, jedoch nicht mit sich selbst. Pro Durchlauf wird jedes Bildpaar nur einmal miteinander verglichen. Demnach hat ein Durchlauf 153 Vergleiche ($18 \cdot 17 / 2 = 153$). Es gab insgesamt 12 Durchläufe. Damit gab es eine totale Anzahl von 1836 Vergleichen. Die Reihenfolge, in der die Bildpaare gezeigt wurden, war zufällig. Ebenso wie auch die Anordnung der Bilder im Vergleich.

2.6 Durchführung

Das Experiment wurde in PsychoPy umgesetzt. Die Probanden hatten die Aufgabe bekommen, das Bild auszuwählen, welches eine stärkere Skalierung hat. Die Versuchsperson hat Entscheidungen mit der linken oder rechten Pfeiltaste getroffen. Nach jeder Entscheidung

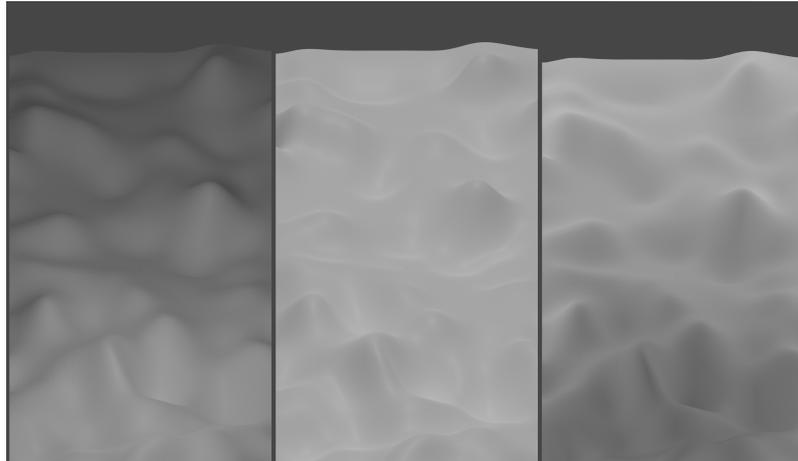


Abbildung 13: Vergleich der Schattenbedingungen bei einer Skalierung von 20%. Links ist das gerichtete Licht, in der Mitte das diffuse Licht und rechts das bearbeitete Licht.

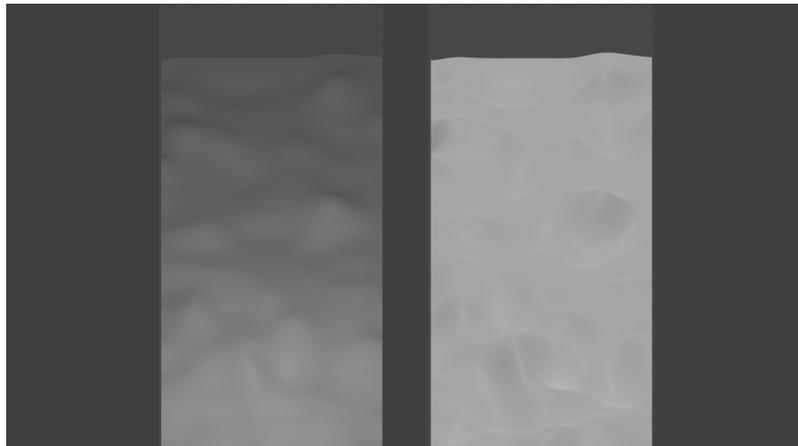


Abbildung 14: Aufbau des Experiments mit MLCM. Die in diesem Beispielvergleich gezeigten Stimuli sind gleich stark skaliert, nur mit verschiedenen Schatten eingefärbt.

wurde für 0,2 Sekunden kein Bild angezeigt. Somit wurde signalisiert, dass ein neuer Vergleich startet. Nach einem Durchlauf gab es immer eine Pause. Die Testperson konnte selbst entscheiden, wieder zu beginnen. Ihr war es auch erlaubt, während des Versuchs Musik zu hören. Vor dem Experiment bekamen die Testpersonen einen 3D Ausdruck von einer solchen Landschaft zu sehen und eine Anleitung zu dem Experiment. Die Testpersonen konnten daraufhin Fragen zum Versuchsablauf stellen. Bei den ersten zwei bis drei Vergleichen wurde kontrolliert, ob sie die Aufgabe verstanden haben. Für den Versuch wurde eine Augenklappe getragen, damit nur das dominante Auge sehen kann.

3 Auswertung

Die Daten des Versuchs wurden in R als MLCM-Experiment ausgewertet und durch die Python matplotlib visuell dargestellt.

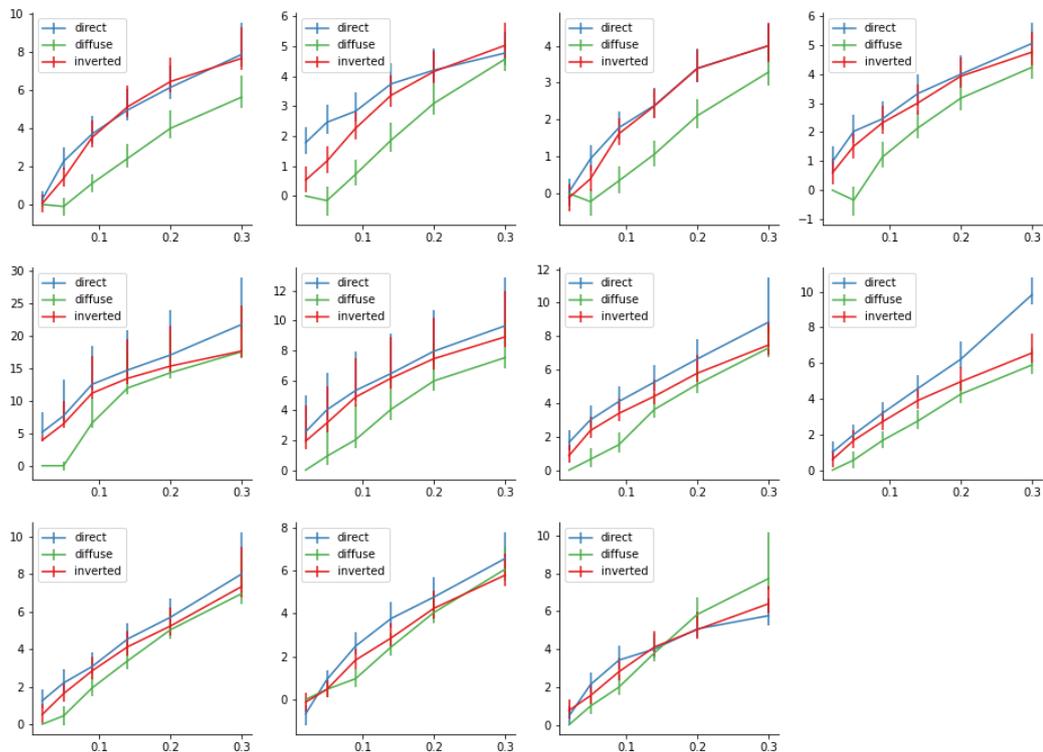


Abbildung 15: Zu sehen sind die durch das MLCM Experiment entstandenen Daten interpretiert durch R. Es gibt drei Kurven: blau für das direkte Licht, grün für das diffuse Licht und rot für das bearbeitete unrealistische Licht. Je höher ein Wert ist, desto besser ist dieser unterscheidbar.

3.1 MLCM-Graphen

Die auf den Entscheidungen der Versuchspersonen basierenden Skalen aller Versuchspersonen sind in der Abbildung 15 zu erkennen. Dargestellt ist die Unterscheidbarkeit auf den einzelnen Skalierungsgraden der Landschaft. Die Daten für die Graphen werden durch die Anwendung von MLCM in R erzeugt. Auf der x-Achse zeigt dieser die Skalierung der Höhe in Prozentwert zu dem Originalbild und auf der y-Achse die Unterscheidbarkeit. Je höher der Funktionswert an einer Stelle ist, desto besser kann auf dieser Höhenskalisierung die Tiefe eingeschätzt werden. Der genaue Wert auf der y-Achse spielt jedoch keine Rolle im Vergleich zwischen den einzelnen Testpersonen. Der blaue Graph zeigt die direkte Lichtquelle, der rote Graph die invertierte Lichtquelle und der grüne Graph die diffuse Lichtquelle. Jeweils bei den gezeigten Höhen sind zusätzlich Fehlerbalken abgetragen, die den Standardfehler anzeigen.

Aufgrund meiner These hätte ich erwartet, dass die Skalen der beiden realistischen Lichtbedingungen, also der von vorn gerichteten Lichtquelle und des diffusen Lichts, stärker ansteigen als die der bearbeiteten Lichtbedingung.

Generell gibt es keine genauen Ergebnisse, die für alle Testpersonen gelten. Es gibt jedoch Trends, die für einige Personen gleichzeitig gelten. So liegt der Startwert der einzelnen Graphen schon am Start für manche Testpersonen weiter auseinander. Alle Versuchspersonen zeigen monoton ansteigende perzeptuelle Skalen. Das bedeutet, dass aufeinanderfolgende Höhenabstufungen voneinander unterscheidbar sind. Von den 11 Testpersonen zeigen vier einen deutlichen langsameren Anstieg der Skala der diffusen Beleuchtung. Für fünf weitere ist der Anstieg dieser Skala besonders bei den flachen Ebenen nicht eindeutig, aber für höhere Abstufungen ähnlich zu den anderen. Die übrigen beiden Skalen sind ähnlich zu einander

und der Anstieg aller Schattenbedingungen ist gleich.

Daraus kann man schließen, dass das diffuse Licht schwerer zu bewerten ist, besonders bei niedrigen Skalierungen. Im Vergleich zu den anderen Schatten wird diese Schattenbedingung weniger genau bewertet und wirkt dadurch teils flacher, also weniger skaliert, als sie wirklich ist. Es gibt besonders kaum Abweichungen in der Unterscheidbarkeit des diffusen Lichts zwischen 2% und 5% Skalierungen, für manche Testpersonen sogar bis 9%. Dahingehend sind über alle Höhen hinweg kaum Unterschiede im Vergleich zwischen dem direkten und dem invertierten Licht zu erkennen. Wenn es Unterschiede zwischen ihnen gibt, sind diese meistens nur bei den höchsten Skalierungen. Daraus ist erkennbar, dass diese sehr ähnlich auf die Testperson wirken, obwohl das invertierte Licht nicht natürlich ist. Es gibt jedoch auch Testpersonen, die alle Schattenkonditionen gleich bewerteten.

3.2 Heatmap

Um nun genauer herauszufinden, ob es trotzdem Unterschiede bei einzelnen besonderen Fällen gibt die durch die MLCM-Graphen nicht erkennbar sind benutze ich Heatmaps. Durch diese kann die absoluten Ergebnisse aller Vergleiche genau ansehen und somit auch wie sich die schwächer ansteigenden Skalen unterscheiden. So bekomme ich einen tieferen Einblick, ob einige Entscheidungen in Vergleichen immer übereinstimmen und deswegen in dem MLCM-Graphen so abgebildet sind oder vielleicht die Beobachter sich selbst nicht sicher sind.

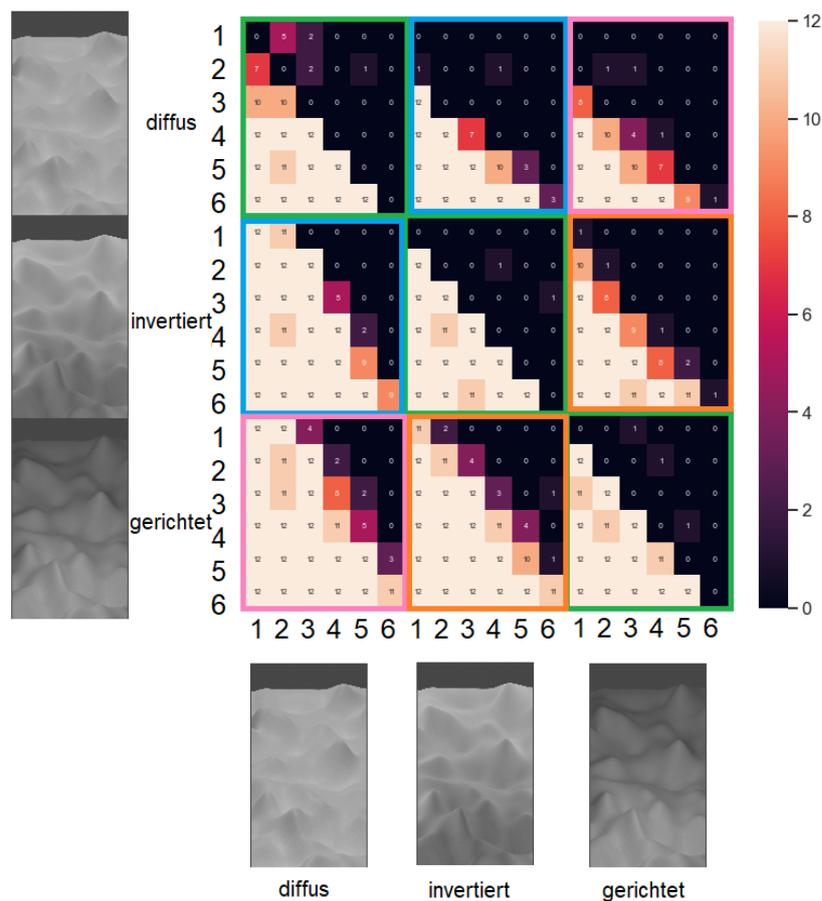


Abbildung 16: Dieses Bild zeigt eine Heatmap der Entscheidungen einer Person. Die Zahl in den Feldern beschreibt wie oft das linke Bild im Vergleich zu dem unten genannten Bild ausgewählt wurde.

Abbildung 16 zeigt eine Heatmap mit allen Entscheidungen einer einzelnen Testperson. Diese kann so interpretiert werden, dass das Bild auf der linken Seite mit dem Bild von unten verglichen wird. Das Heatmap ist in Zellen unterteilt, die die Vergleiche der einzelnen Schattierungen und Skalierungen angeben. Die Zahl in der Zelle dieser zugehörigen Bilder gibt an, wie oft in dieser Darstellung die linke Landschaft im Vergleich als höher wahrgenommen wurde.

In der in grün eingefärbten Hauptdiagonalen werden demnach die selben Schattenbedingungen miteinander verglichen. Für die in Abbildung 16 gezeigte Heatmap wird in Vergleichen mit den gleichen Schattenbedingungen eigentlich nie eine weniger skalierte Landschaft über der höheren genommen. Die einzige Ausnahme befindet sich bei Vergleichen von dem diffusen Licht. Dort wurde die am wenigsten skalierteste Landschaft fünf Mal über der nächst höheren gewählt. Dies ist auch der Fall für die anderen Versuchspersonen, es gibt bei gleichen Schattenbedingungen nur Ausnahmen für die flachsten Landschaften im diffusen Licht.

Bei den anderen Vergleichen mit dem diffusen Licht, denen im Bild blau und rosa eingefärbten Vergleichen, ist zu erkennen, dass bei gleicher Höhe von dem diffusen Licht und mit einem andere Licht immer das andere Licht gewählt wird. Bei den flachen Landschaften, also den wenig skalierten Landschaften, werden teils sogar die andere Lichtbedingung als höher betrachtet als die nächsthöhere Skalierung des diffusen Lichts. Bei dem bearbeiteten Licht, den im blau gekennzeichneten Feldern, ist das bis zur 2. Skalierung und der 3. Skalierung des diffusen Lichts so, bei der gerichteten Lichtquelle, den in rosa gekennzeichneten Feldern, bis zur 3. Skalierung dieser und der 4. Skalierung des diffusen Lichts klar erkennbar. Ein ähnliches Muster gibt es für mehr als die Hälfte der Testpersonen. Besonders erneut bei den flachen Landschaften gibt es eine große Bevorzugung von anderen Lichtern über dem diffusen Licht. Bei einzelnen Versuchspersonen ist die Bevorzugung sogar noch stärker. Das verifiziert meine 2. Hypothese, da besonders bei diesen wenig skalierten Landschaften es zu vielen Ungenauigkeiten in den Bewertungen der einzelnen Versuchspersonen gibt. Jedoch lässt die Bevorzugung bei immer mehr skalierten Landschaften nach. Trotzdem empfinden nur fünf der elf Versuchspersonen bei den Vergleichen des diffusen Lichts auf der höchsten Skalierung dieses mit teilweise genauso viel Tiefe oder teils sogar mehr Tiefe als die anderen Lichtbedingungen.

Bei den Vergleichen der gerichteten und der bearbeiteten Lichtquelle, also den in orange gekennzeichneten Feldern, hat diese Versuchsperson bei den Betrachtungen der gleichen Höhe die gerichtete Lichtquelle bevorzugt und auch fast immer eindeutig gewählt. Diesen Trend gibt es für sieben der elf Testpersonen. Bei drei dieser Versuchspersonen waren die Vergleiche der beiden Lichter ausgeglichen. Für eine Versuchsperson war zunächst sehr eindeutig das gerichtet Licht besser, jedoch für die beiden höchsten Landschaften ausgeglichen.

Für die Testperson in Abbildung 16 gilt demnach auch, dass das gerichtete Licht besser Tiefe darstellt als die anderen beiden. Das bearbeitete Licht ist ähnlich gut wie das gerichtete Licht. Beide Lichtquellen sind viel besser als das diffuse Licht, besonders bei den wenig skalierten Landschaften. Für die meisten Personen gilt dies auch so. So besitzen sechs weitere Versuchspersonen die selbe generelle Reihenfolge mit geringen Abweichungen. Nur eine Testperson empfindet die diffusen höchst skalierten Bilder als die mit der meisten Tiefe. Dadurch wird meiner 1. Hypothese widersprochen. Ein realistisches und unrealistisches Licht besitzen fast die selben Ergebnisse, jedoch zeigen beide mehr Tiefe als ein realistisches Licht mit dem diffusen Licht. Diese Erkenntnis widerspricht auch meiner 3. Hypothese, da alle Testpersonen eine leicht andere Wahrnehmung besitzen.

3.3 Durchschnittliche Antwortzeiten

Bei den Heatmaps habe ich teils vermutet, dass es bei eigentlich sehr eindeutigen Vergleichen trotzdem zu unerwarteten Ergebnissen kam. Wenn dies der Fall wäre, müsste es bei den von mir als trivial empfundenen Vergleichen eine schnelle Antwortzeit geben. Um dies zu überprüfen, wollte ich mir die durchschnittliche Antwortzeit dieser Vergleiche genauer ansehen.

bei diesen Vergleichen auch generell bessere Entscheidungen getroffen und keinen richtigen Favoriten zwischen den Lichtbedingungen.

Aus der Analyse der Antwortzeiten kann ich schließen, dass eine höhere Skalierung der Landschaft die Vergleiche erschwert, wodurch die Landschaften ähnlich viel Tiefe zeigen. Für einige Personen sind Vergleiche der tiefen Skalierungen sehr schnell, also gibt es einige Lichter die mehr Tiefe zeigen. Für andere Testpersonen sind diese jedoch auch ziemlich gleich.

3.4 Fragebogen

Die Versuchspersonen wurden direkt nach dem Versuch noch zusätzlich befragt. Dadurch wollte ich das Empfinden der Personen über den Versuch herausfinden und schauen, ob es Unterschiede zu den Daten gibt. Von den elf Personen fanden sechs die frontale Lichtquelle am besten um Tiefe zu erkennen, vier Personen die diffuse Schattenbedingung und eine das bearbeitete Licht. Die Testpersonen haben sich größtenteils auf die gleichen Stellen im Bild konzentriert. Vier der Versuchspersonen haben auf den oberen Rand geachtet. Zusätzlich meinten zwei der elf Versuchspersonen, dass der Versuch einfacher wurde und sie sich dadurch öfter verklickt haben. Andere zwei Testpersonen meinten, dass sie sich durch die Länge des Versuchs am Ende nicht mehr gut konzentrieren konnten. Fünf Personen äußerten, dass die Bilder teils gleich oder sehr ähnlich sind.

4 Diskussion

4.1 Ergebnisse der Auswertung

Es gibt einen kleinen Trend dafür, dass das gerichtete Licht das bestbewertete Licht ist und somit am meisten Tiefe darstellt. Besonders, wie es durch die Heatmaps erkennbar ist, ist das gerichtete Licht besonders bei den wenig skalierten Landschaften das bestbewertete, also wenn es kaum Merkmale in der Landschaft gibt. Bei diesen Landschaften wird von den meisten Personen auch das bearbeitete Licht über dem diffusen Licht präferiert. Im Vergleich wird das diffuse Licht mit viel weniger Tiefe betrachtet. Durch die MLCM-Graphen bekommt man das selbe Ergebnis.

Vergleiche zwischen stärker skalierten Landschaften sind generell schwerer, beziehungsweise besitzen diese ähnlich viel Tiefe wodurch die Entscheidungen der Versuchspersonen bei diesen Vergleichen mehr schwanken. Die Vergleiche zwischen diesen Landschaften benötigen durchschnittlich auch mehr Zeit, durchgehend für alle Versuchspersonen. Bei den hoch skalierten Landschaften gleichen sich die einzelnen Schattenbedingungen auch mehr aus. Bei wenig skalierten Landschaften sind jedoch definitive Unterschiede vorhanden. Die Vergleiche zwischen dem bearbeiteten und dem gerichteten Licht haben jedoch im Durchschnitt eine längere Antwortzeit und mehr unterschiedliche Entscheidungen. Dies kann dadurch entstehen, dass das bearbeitete Licht aus dem gerichteten Licht erzeugt wurde und diese somit sehr ähnlich sind. Nichtsdestotrotz besitzt das gerichtete Licht einen Vorsprung gegenüber dem unrealistischen Licht.

Aus den Ergebnissen meines Versuches lässt sich nun schließen, dass wenn wenig skalierte Landschaften benutzt werden ein gerichtetes Licht verwendet werden sollte. Wenn es mehrere Merkmale im Bild gibt, hat dieses immer noch einen kleinen aber nicht sehr relevanten Vorsprung gegenüber anderen Lichtquellen. Jedoch macht es kaum einen Unterschied, ob nun ein echtes Licht oder ein unreelles Licht verwendet wird.

4.2 Probleme zu den Schatten

Unterschiede zwischen den realistischen und unrealistischen sind kaum vorhanden. Ein realistisches Licht ist zwar jenes, welches am besten Tiefe erzeugt, jedoch ist das andere realistische Licht schlechter bewertet. Dass es keine Unterschiede zwischen realistisch und unrealistisch

gibt, kann daran liegen, weil viele Testpersonen das bearbeitete Licht nicht als unrealistisch erkannt haben. Das Leuchten der Berge war nicht klar genug oder Sie dachten, es handelt sich um ein Licht von hinten. Der unrealistische Schatten ist auch nicht viel anders, als ein Licht von hinten.

Es gab zudem Probleme mit den Schatten, welche durch das diffuse Licht erzeugt wurden. Diese empfand man als leicht unrealistisch. Das liegt daran, dass die diffuse Lichtquelle hell ist und somit kein großer Kontrast entsteht. Besonders bei niedrigen Skalierungen gab es keinen großen Kontrast, wodurch es dort häufiger zu Fehlern kam.

Durch diese Punkte ist in der Wahrnehmung der Testpersonen das diffuse Licht eher unrealistisch und das bearbeitete eher realistisch. Demnach würden die Testpersonen die für sie als realistisch empfundenen Schatten besser als die unrealistischen Schatten bewerten.

Das gerichtete Licht ist gut gelungen und muss nicht weiter verändert werden. Das diffuse Licht müsste etwas dunkler werden, damit mehr Kontrast entstehen würde.

4.3 Probleme bei dem Versuchsaufbau und der Landschaft

Die Landschaft ist gut genug ausgeglichen. Es gab einige Merkmale, an denen die Höhenunterschiede untersucht wurden. Es wurde durch die Testpersonen sowohl an den Bergen als auch an den Tälern geschaut, welche Landschaft mehr skaliert ist. Die Landschaft hätte jedoch trotzdem noch etwas anders sein können, da alle Testpersonen auch auf dieselbe Stelle geachtet haben. Trotzdem gab es bei allen Versuchspersonen unterschiedliche Entscheidungen. Dadurch kann gefolgert werden, dass die Landschaft bei den Entscheidungen nicht selbsterklärend ist, sondern die Schatten eine größere Auswirkung haben.

Es gab jedoch ein Problem, das am oberen Ende des Bildes das Relief der Landschaft zu sehen war. Dadurch kann die Höhe theoretisch sehr leicht unterschieden werden, wodurch die Höhenunterschiede durch die Schatten eliminiert werden. Auch wurde der Versuchsaufbau dadurch überflüssig, da die 3D-Illusion durch die Augenklappe aufgehoben wurde.

4.4 Mögliche Änderungen des Versuchs

Nach dem Durchführen und der Auswertung des Versuchs sind mir einige Punkte aufgefallen, die bei dessen Fortführung verbessert werden könnten. Zunächst sollte das diffuse Licht abgeändert werden. Das durch die Sonne erstellte Licht ist zu hell und dadurch gibt es weniger Kontrast in der Landschaft. Ein wichtiger Punkt, der geändert werden muss, ist das erkennbare Relief an der Oberseite des Bildes. Durch das Relief erhält die Versuchsperson zu viel Information und macht den Versuch zu einfach. Es haben jedoch nicht viele Personen auf das Relief geachtet. Selbst wenn sie an diese Stelle geschaut haben, haben sie trotzdem unterschiedliche Entscheidungen getroffen. Ohne dieses Relief wäre der Versuch jedoch schwieriger. Es sollte aber trotzdem darauf geachtet werden, dass durch einen eventuell schwarzen Balken keine Berge abgeschnitten werden. Man könnte am Rand des Bildes die Kontur der Berge vergleichen, was denselben Effekt hätte, wie keinen Balken einzufügen. Also sollten sich im Hintergrund der Landschaft keine hohen Berge befinden.

Eine weitere mögliche Untersuchung ist, ob die Landschaft einen Einfluss auf die Bewertung durch die Testpersonen hat. Dafür müssten mehrere Landschaften von den selben Testpersonen untersucht und dann verglichen werden, ob sich die Ergebnisse ändern. Theoretisch könnten die Landschaften auch abgeändert oder ganz anders realisiert werden. Es könnten auch andere Schattenbedingungen untersucht werden, wie zum Beispiel zwei Lichtquellen gleichzeitig. Ich hatte zwar zunächst keine passende Möglichkeit dafür gefunden, aber ich denke, es ist trotzdem möglich. Das ist besonders für die Frage, ob andere unrealistische Schatten einen anderen Einfluss haben, relevant.

4.5 Auseinandersetzung mit den Hypothesen

Nun möchte ich auf meine zuvor festgelegten Hypothesen erneut eingehen.

1. *Echte Schattenbedingungen sind besser unterscheidbar als unrealistische Schattenbedingungen.*
Die erste Hypothese widerlege ich. Das gerichtete Licht ist zwar das am besten bewertete, jedoch ist die unrealistische Schattenbedingung nicht viel schlechter bewertet. Das diffuse Licht ist außerdem viel schlechter bewertet als das unrealistische Licht. Die Hypothese würde ich so umformen, dass nicht realistisch oder unrealistisch wichtig ist, sondern dass ein gerichtetes Licht mehr Tiefe bringt als ein indirektes Licht.
2. *Bei den flachen Landschaften kommt es häufiger zu Fehlern.*
Die zweite Hypothese verifiziere ich. Bei den niedrig skalierten Landschaften haben die meisten Testpersonen einen Favoriten. Dieser Favorit ist bei den meisten Personen das direkte oder das bearbeitete Licht. Diese Bevorzugung führt dazu, dass es teils zu Fehlern in der Bewertung kommt. Diese beiden bevorzugten Lichtbedingungen werden auf einer Skalierung von 2% teils über dem diffusen Licht auf einer Skalierung von 5% oder sogar 9% gewählt. Bei den tiefen Skalierungen gibt es somit die zufälligsten Entscheidungen und die meisten Fehler.
3. *Die Testpersonen werden alle die gleiche Wahrnehmung haben.*
Die dritte Hypothese falsifiziere ich. Generell haben die meisten Testpersonen zwar das direkte Licht präferiert, jedoch gibt es auch eine Person, die eindeutig das diffuse Licht am besten bewertet hat. Die einzelnen Entscheidungen der Personen sind auch anders, wie beispielsweise in den MLCM-Graphen zu sehen ist. Manche Testpersonen haben auch Probleme mit den Entscheidungen auf tieferen Skalierungen. Die Testpersonen haben auch eine unterschiedliche Wahrnehmung des bearbeiteten Lichts. Für einige ist die Wahrnehmung dieses Lichts sehr ähnlich zu dem des direkten Lichts, für die anderen irgendwo zwischen dem direkten und dem diffusen Licht. Daraus kann gedeutet werden, dass nicht alle die gleiche Wahrnehmung haben. Trotzdem gibt es große Trends in die Richtung, dass das direkte Licht Tiefen am besten darstellt.

4.6 Fazit

Durch meinen Versuch habe ich festgestellt, dass zwischen den von mir untersuchten Schattenbedingungen gerichtete Lichter bei flachen Landschaften mehr Tiefe darstellen. Dabei hat auch das invertierte Bild von dem gerichtetem Schatten mehr Tiefe dargestellt als die diffuse Schattenbedingung. Zudem haben alle Testpersonen eine unterschiedliche Wahrnehmung. Diese können in einzelnen Gruppen zusammengefasst werden, jedoch gibt es innerhalb der Gruppen Unterschiede. Außerdem scannen Menschen die Bilder verschieden und achten dann immer auf die von ihnen präferierten Merkmale. Wenn ich nun in einem generierten Video Schatten darstellen möchte, die realistisch wirken sollen, würde ich eine direkte Lichtquelle verwenden, besonders wenn es nur wenige oder schlecht erkennbare Merkmale gibt.

Literaturverzeichnis

„Blender Homepage“. Abrufdatum: 11.10.2022.

Bunnell, Michael. 2005. „Dynamic ambient occlusion and indirect lighting“. Kap. 14 in *GPU gems 2 : programming techniques for high-performance graphics and general-purpose computation*, herausgegeben von Matt Pharr und Randima Fernando, 223–233. Boston: Addison-Wesley Professional.

„Cycles Renderer“. Abrufdatum: 12.10.2022.

Gerardin, Peggy, Marie de Montalembert und Pascal Mamassian. 2007. „Shape from shading: New perspectives from the Polo Mint stimulus“. *Journal of Vision* 7 (13): 1–11.

Hamelin, Jean Francois. 2020. *VIEWPixx Installation Guide Version 1.1*. Saint Bruno, Quebec: VPixx Technologies Inc.

Kim, Juno, Phillip J. Marlow und Barton L. Anderson. 2014. „Texture-shading flow interactions and perceived reflectance“. *Journal of Vision* 14 (1): 1–19.

Kleffner, Dorothy A., und Vilayanur S. Ramachandran. 1992. „On the perception of shape from shading“. *Perception & Psychophysics* 52 (1): 18–36.

Knoblauch, Kenneth, und Laurence T. Maloney. 2012. *Modeling Psychophysical Data in R*. New York: Oxford University Press.

Mendez-Feliu, Alex, und Mateu Sbert. 2009. „From obscurances to ambient occlusion: A survey“. *The Visual Computer* 25:181–196.

Peirce, J. W., J. R. Gray, S. Simpson et al. 2019. „PsychoPy2: Experiments in behavior made easy“. *Behav Res* 51:195–203.

Reichelt, Stephan, Ralf Haeussler, Gerald Fuetterer et al. 2010. „Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays“. *SPIE-Proceedings* 7690:76900B.

Schluetz, Max Victor. 2020. „Perception of Unrealistic Shading in VR Headsets vs. on Screen“.

Snowden, Robert, Peter Thompsen und Tom Troscianko. 2012. *Basic vision: An introduction to visual perception*. New York: Oxford University Press.

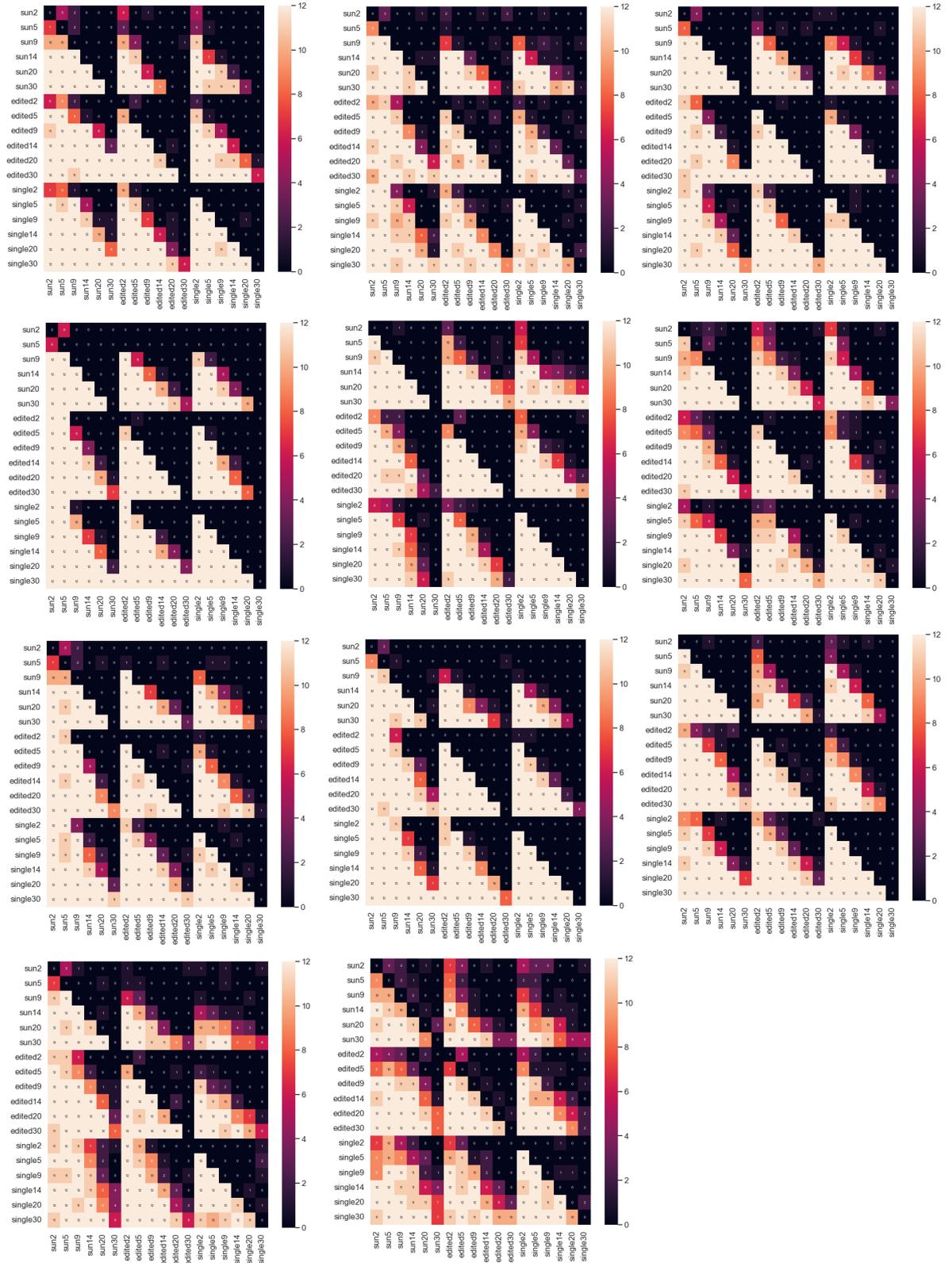
Valle-Inclán, Fernando, Manuel J. Blanco, David Soto et al. 2008. „A new method to assess eye dominance“. *Psicologica* 29:55–64.

Vishwanath, Dhanraj. 2011. „Reconciling Pictures and Reality: Information in Surface and Depth perception:“ Kap. 7 in *Perception Beyond Inference*, herausgegeben von Liliana Albertazzi, Gert J. van Tonder und Dhanraj Vishwanath, 201–240. Massachusetts: The MIT Press.

Abbildungsverzeichnis

1	Neckerwürfel	1
2	Beispiel Shape form Shading	2
3	Versuchsaufbau Schlütz	3
4	Veränderte Landschaft durch Veränderung der Farben	6
5	In Blender veränderte Eigenschaften von Oberflächen	6
6	Abstands Wirkung	7
7	Darstellung zu den Problemen der Distanz	8
8	Versuchsaufbau Pilotexperiment 2	8
9	MLDS Versuch	10
10	MLDS Versuch 2	11
11	Frontales Licht, alle Stufen	13
12	Vergleich der Bilder bei Skalierung 2	14
13	Vergleich der Bilder bei Skalierung 20	15
14	Aufbau MLCM-Experiment	15
15	Vergleich der durch MLCM generierten Graphen	16
16	Auswertung einer Heatmap	17
17	Durchschnittszeiten der Versuchspersonen	19
18	Durchschnittszeiten pro Person	19
19	Heatmaps aller Personen	26
20	Zeit pro Vergleich aller Personen	27

A Anhang



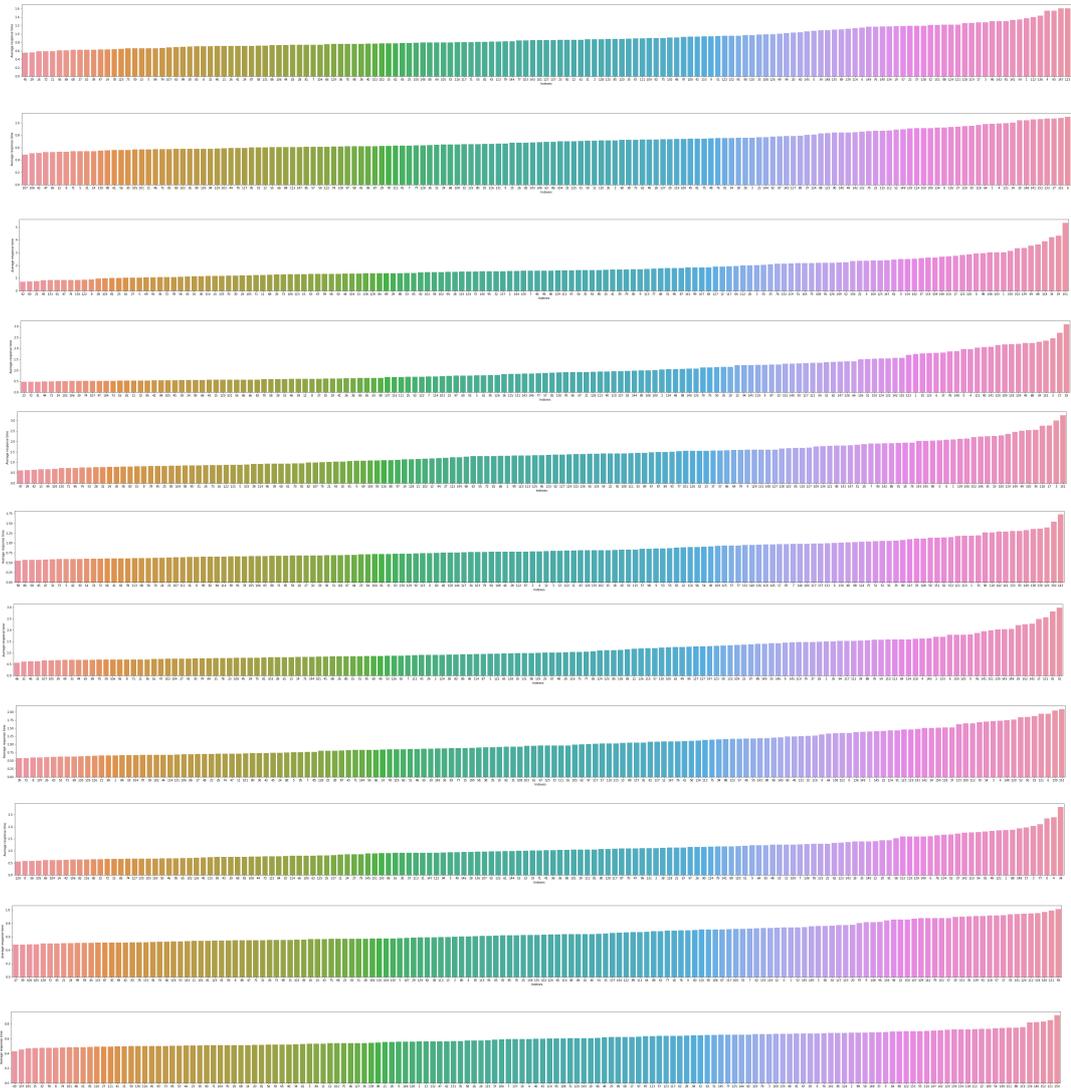


Abbildung 20