

Untersuchung von Blaulichtgefährdung und Leuchtdichteadaptation in Virtual-Reality-Szenen mit Tageslicht

Marina Leontopoulos, M. Sc., Dr. Martine Knoop

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

marina.leontopoulos@tu-berlin.de

Abstract

Im Rahmen der Vorbereitung auf Probandenversuche, die verschiedene Tone Mapping-Verfahren für die Anwendung in der Virtual Reality (VR) miteinander vergleichen sollen, wurde ein VR-Head mounted Display (VR-HMD) auf potentielle Risiken bzgl. einer Blaulichtgefährdung untersucht. Nach gängigen Standards lassen sich VR-HMDs in die gefahrlose Risikogruppe 0 einordnen. Dies gilt ebenfalls für aktuelle Prototypen, die Leuchtdichten bis 6000 cd/m^2 wiedergeben können. Zudem wurde eine Einschätzung gegeben, ob Kinder potenzieller Blaulichtschädigung ausgesetzt werden könnten, was ebenfalls verneint werden konnte.

Demnach lassen sich beliebige Probandenversuche mit Tageslicht in der VR durchführen, ohne dass eine Blaulichtschädigung auftreten kann.

Da die dem Markt verfügbaren VR-HMDs lediglich in der Lage sind Leuchtdichten bis ca. 250 cd/m^2 darzustellen, soll ein Vergleich verschiedener Tone Mapping-Verfahren in Form eines empirischen Experiments stattfinden. Dabei ist es Ziel, festzustellen, ob es trotz der geringen Leuchtdichten des Displays möglich ist, Szenen mit Tageslicht so in der Virtual Reality darzustellen, dass ein Proband sie als Tageslicht empfindet.

1 Einleitung

Durch die sich stetig weiterentwickelnde Technologie werden Probandenversuche immer häufiger in der Virtual Reality umgesetzt. Am Fachgebiet Lichttechnik der *Technischen Universität Berlin* besteht ebenfalls der Bedarf an einer Virtual Reality (VR) Plattform für Probandenversuche, u.a. mit Tageslicht-Szenen. Allerdings sind weder Software noch Hardware in der Lage Tageslicht umfassend darzustellen. Während an aktuellen Game Engines die Simulationsmöglichkeiten von Licht stetig weiterentwickelt werden und auch Grafikkarten existieren, die aufwendiges Raytracing in Echtzeit berechnen, ist bisher keine technische Lösung bekannt, die es ermöglichen könnte, Displays mit einem kontinuierlichen Spektrum bei Leuchtdichten bis zu 10^9 cd/m^2 zu konstruieren. Aus diesen Einschränkungen ergibt sich die Notwendigkeit,



Wege zu finden, um Szenen, die in der Realität Leuchtdichten jenseits des Wiedergabebereichs eines Displays haben, überzeugend darzustellen.

Durch die Vorstellung eines VR-HMD-Prototypen von Facebook mit einer maximalen Leuchtdichte von 6000 cd/m^2 [1], wurde die potenzielle Gefährdung durch Blaulicht (Blue Light Hazard, BLH) als Erstes betrachtet, um einerseits die Sicherheit der Probanden zu gewährleisten und andererseits zu untersuchen, bei welcher maximalen Leuchtdichte des Displays eine Gefährdung ausgehen könnte.

2 Bestimmung des Blue Light Hazards bei VR-HMDs nach gängigen Richtlinien

Die am Fachgebiet vorhandene VR-Brille wurde zunächst spektral mittels eines JETI Specbos 1201 Spektroradiometers vermessen und anschließend mit der Blue Light Hazard-Funktion nach [2] gewichtet. Abb. 1 zeigt die gemessene spektrale Verteilung als gestrichelte Linie und das BLH-gewichtete Spektrum als durchgehende blaue Linie. Die maximale Leuchtdichte betrug bei Vollaussteuerung aller Kanäle (Rot, Grün und Blau bei 100%) ca. 146 cd/m^2 .

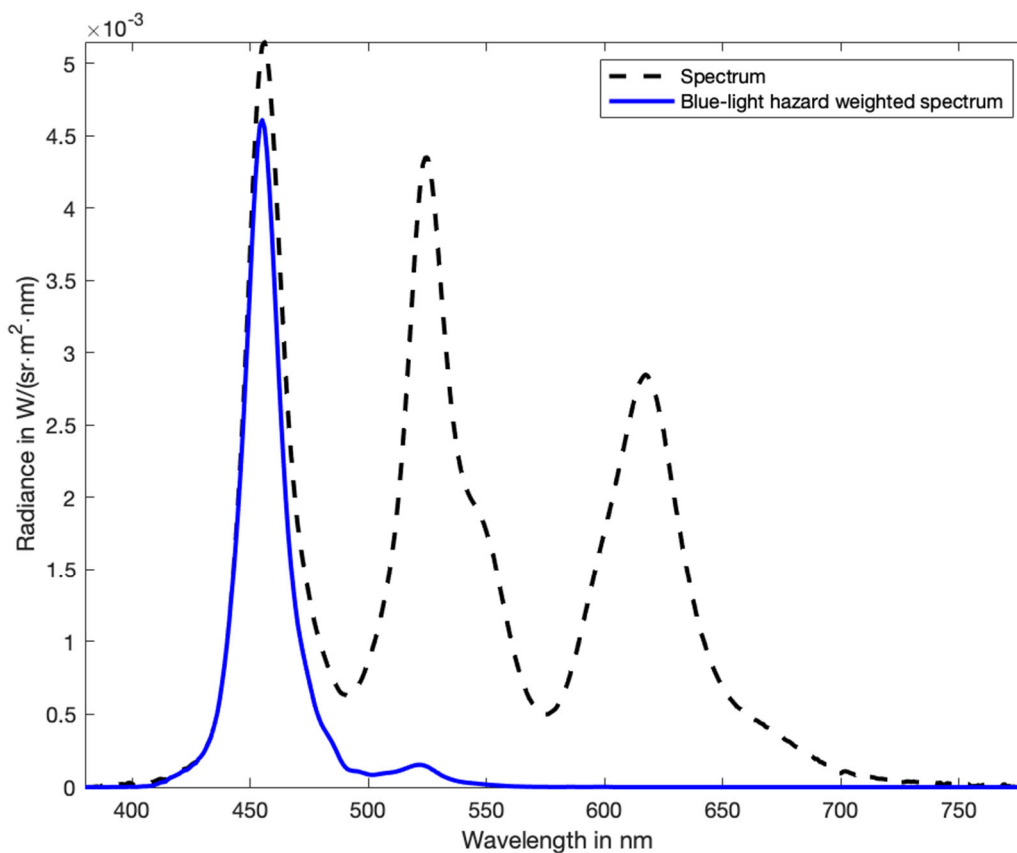


Abb. 1: Spektrale Verteilung VR-HMD bei 255,255,255

Um die daraus resultierende potentielle Gefährdung durch Blaulicht zu berechnen, wurde Gleichung (1) herangezogen [2].

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

Die BLH-gewichtete Strahldichte L_B beträgt nach (1) für das vermessene VR-HMD $0,1198 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$. Der ermittelte Wert liegt dabei ca. um den Faktor 835 unterhalb des in [2] angegebenen Expositionslimit von $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ bei einer Betrachtungsdauer von über $10\,000 \text{ s}$ (ca. 2,8 h). Um eine Gefährdung bei kürzeren Betrachtungsdauern ausschließen zu können, müsste die BLH-gewichtete Strahldichtendosis D_B unter $10^6 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ liegen, was im betrachteten Fall immer gegeben ist (siehe Gleichung (2)).

$$D_B = L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot t \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

$$D_B = 0,1198 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ sr} \cdot 10000 \text{ s} \quad (2a)$$

$$= 1198 \text{ J}/\text{m}^2 \text{ sr} < 10^6 \text{ J}/\text{m}^2 \text{ sr} \quad (2b)$$

2.1 Einordnung in eine Risikogruppe

Zur Einordnung des vermessenen VR-HMDs in eine Risikogruppe nach IEC 62471 sollen die Werte, die eine Gefahr bedeuten sollen, bei einer Distanz von 200 mm betrachtet werden [3, S. 59], wobei die bei einem VR-HMD übliche Distanz zwischen Display und Auge bei ca. 35 mm liegt. Diese geringere Entfernung hat allerdings keinen Einfluss auf die retinale Blaulichtgefährdung, da die lokale Bestrahlungsstärke trotz kürzerer Sehentfernung auf der Retina konstant bleibt [4].

Auch wenn die Grenzen zwischen den Risikogruppen (*engl. Risk Group, RG*) nicht scharf gezogen werden können, sollen sie ein potenzielles Risiko aufzeigen, dass zwar auftreten könnte, aber nicht muss [3, S. 59]. Die vier Risikogruppen sind in Tab. 1 ausschließlich für Blue Light Hazard aufgeführt, da die anderen Risikofaktoren, wie u.a. eine Nah-UV-Gefährdung und eine retinale thermale Gefährdung im gegebenen Fall ausgeschlossen werden können. Die genauen Expositionslimits für Blue Light Hazard hängen von der Größe der Lichtquelle ab und sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 1: Blue Light Hazard – Einteilung in Risikogruppen nach [3, S. 59 – 61]

RG 0	RG 1	RG 2	RG 3
Keine Überschreitung des BLH Expositionslimits innerhalb von			Lichtquellen, die bei sehr kurzer Exposition zu einer Schädigung führen können.
2,8 Stunden	100 Sekunden	0,25 Sekunden	

Tab. 2: Blue Light Hazard-Expositionslimits nach [3, S. 63]

Quellengröße	Formelzeichen	Emissionsgrenze			Einheit
		Ungefährlich	Geringes Risiko	Mittleres Risiko	
Groß	L_B	100	10000	4000000	$W/(m^2 sr)$
Klein	E_B	1	1	400	W/m^2

Das vermessene VR-HMD deckt laut Herstellerangaben ein Gesichtsfeld von 110° ($\cong 1,920$ rad) [5] ab und ist als große Quelle zu betrachten, da sie ein größeres Gesichtsfeld als $0,63^\circ$ ($\cong 0,011$ rad) ausfüllt [3]. Durch die Freiheit von darstellbaren Bildern auf einem Display, wäre es möglich, dass bspw. ein Stern mit acht zusammenhängenden weißen Pixeln oder weniger dargestellt werden könnte. Ein solches Bild könnte als kleine Lichtquelle betrachtet werden¹, allerdings ist es anhand der aufgezeigten Emissionsgrenzwerte nicht wahrscheinlich, dass durch das Licht von so wenigen Pixeln BLH-gewichtete Bestrahlungsstärken über $1 W/m^2$ am Auge auftreten können.

Es lässt sich demnach festhalten, dass das geltende Expositionslimit für eine gefahrenfreie Nutzung über längere Zeit bei einem angezeigten Bild von mehr als acht weißen Pixeln bei einer BLH-gewichteten Strahldichte L_B von $100 W/(m^2 sr)$ liegt, wie in Tab. 2 angegeben. Das vermessene VR-HMD ist folglich auch nach Betrachtung der IEC 62471 gefahrenfrei über einen längeren Zeitraum verwendbar.

¹ Berechnung PPD (Pixel per Degree) für das betrachtete VR-HMD, horizontale Auflösung ohne Berücksichtigung der Optik: $1440 \text{ Pixel}/110^\circ = 13 \text{ Pixel}/^\circ$. Das entspricht einer Pixelgröße von ca. $0,08^\circ$ ($\cong 1,343$ mrad), d.h. ein schwarzes Bild mit einem weißen Fleck auf acht Pixeln würde eine kleine Quelle im Sinne der Blue Light Hazard-Betrachtung nach IEC 62471 bedeuten.

Da Geräte aus dem Bereich der digitalen Unterhaltung potenziell acht Stunden und mehr am Stück genutzt werden, darf ein VR-HMD keine höhere Risikogruppe als RG 0 erreichen (Vgl. hierzu auf die Betrachtung von konventionellen Bildschirmen in [4]).

Im Umkehrschluss kann festgestellt werden, dass eine potentielle Blaulichtgefährdung – unter der Annahme einer identischen spektralen Verteilung – erst ab einer maximalen Leuchtdichte von ca. 122.000 cd/m² gegeben wäre. Daraus ergibt sich, dass selbst VR-HMDs mit einer maximalen Leuchtdichte von 6000 cd/m² (unter Annahme der gleichen spektralen Verteilung) ca. um den Faktor 20 höhere Leuchtdichte erzeugen müssten, um potenziellen Schaden anrichten zu können.

Dazu sei noch angemerkt, dass hier eine Pupillenöffnung von 3 mm angenommen wird [3, 4.2.1], obwohl bei Leuchtdichten von 1000 cd/m² [6] eine tatsächliche Pupillenöffnung von 2,5 mm vorliegen würde², was zu einer geringeren retinalen Exposition mit problematischem Blaulicht führt. Als zusätzlicher Schutzmechanismus würde ein Benutzer bei derart hohen Leuchtdichten sicherlich die Augen schließen und das VR-HMD abnehmen.

2.2 Blue Light Hazard bei Kindern

Um eine Gefährdung durch Blaulicht umfassend auszuschließen, muss allerdings noch betrachtet werden, wie sich die BLH-gewichteten Strahldichten auf die Augen von Kindern auswirken könnten. Das vermessene VR-Produkt ist laut Herstellerangaben für Kinder ab 12 Jahren zugelassen.

In [2] wird die Blaulichtgefährdung bei Aphakie mit einer eigens angepassten Gewichtungsfunktion $A(\lambda)$ betrachtet, die sich in den Wellenlängen unter 440 nm von der BLH-Gewichtungsfunktion $B(\lambda)$ unterscheidet. Die Gewichtungsfunktion $A(\lambda)$ gilt auch für Neugeborene, da sie über höhere Transmissionsgrade im Augenmedium verfügen als ältere Kinder und Erwachsene. Aus diesem Grund ist bei Neugeborenen das Expositionslimit geringer als in [3] festgelegt. Beim Vergleich von retinalen BLH-gewichteten Bestrahlungsstärken genügt für das Auge eines Neugeborenen bereits eine BLH-gewichtete Strahldichte von $L_{B, NG} = 36 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$, um Risikogruppe 1 zu erreichen, was einem Faktor von 2,8 entspricht [7].

Die Augen von Kindern mit 12 Jahren sind bzgl. ihrer Größe schon sehr nah an denen von Erwachsenen (vgl. [6] und [8]), allerdings unterscheidet sich der Transmissionsgrad der Augenmedien voneinander. Dieser Zusammenhang ist in

² Berechnung der Pupillengröße nach [6, 1.4.2.1]: $d_p = 7,75 - 5,75 \cdot \left(\frac{x}{x+2}\right)$ mit $x = \left(\frac{L \cdot \alpha^2}{846}\right)^{0,41}$

Abb. 2 dargestellt: Im Wellenlängenbereich zwischen ca. 430 nm und 550 nm weisen Kinderaugen weniger optische Trübung auf und transmittieren daher einen größeren Teil der eintreffenden Strahlung. Eine Blue Light Hazard-Gewichtungsfunktion für Erwachsene ist daher nicht ohne Weiteres für Kinder anwendbar.

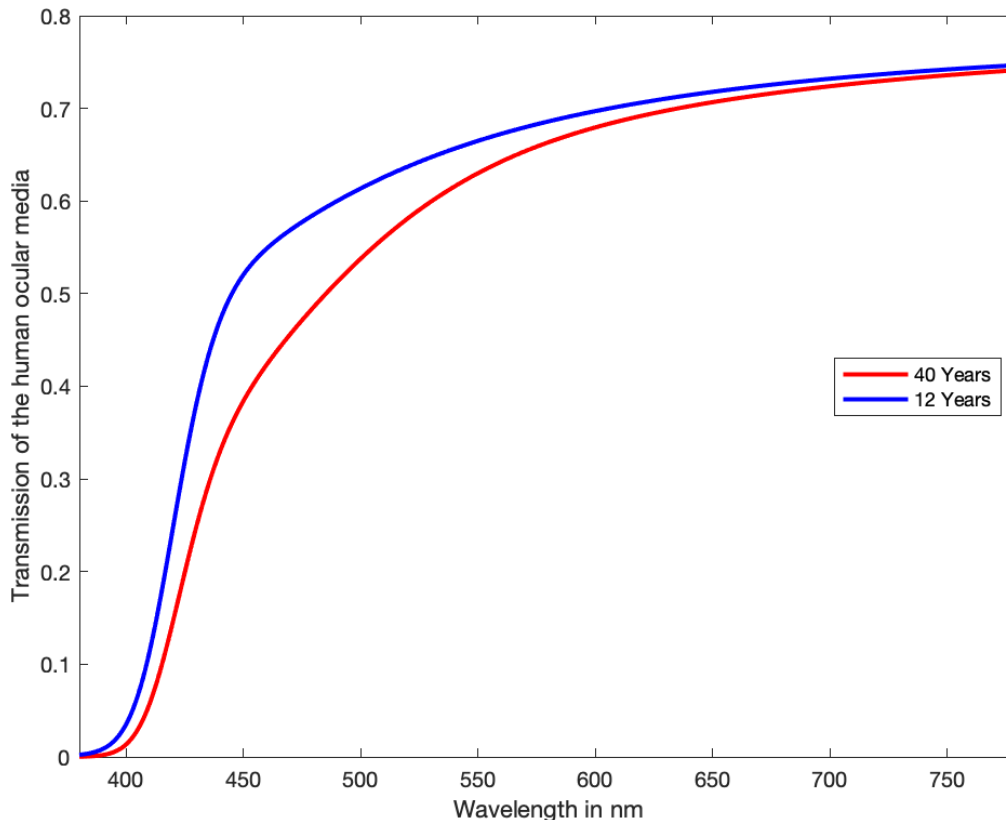


Abb. 2: Transmissionsgrade des Augenmediums
bei verschiedenen Altersstufen nach [9]

Anders als bei [7], wo BLH-gewichtete Strahldichten zur Risikogruppenermittlung aus retinalen BLH-gewichteten Bestrahlungsstärken zurückgerechnet wurden, wurde hier lediglich Gleichung (1) um eine zusätzliche korrigierende spektrale Gewichtung erweitert, sodass die äquivalente BLH-gewichtete Strahldichte $L_{B,12}$ für ein 12-jähriges Auge ermittelt werden kann (siehe Gleichung (2)).

$$L_{B,12} = L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \frac{\tau_{12}(\lambda)}{\tau_{40}(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

Mit $\tau_{12}(\lambda)$ / $\tau_{40}(\lambda)$: Transmissionsgrade eines 12-jährigen Kindes / eines 40-jährigen Erwachsenen.

Da die Blue Light Hazard Richtlinie der ICNIRP, ebenso wie die IEC 62471 von erwachsenen Personen ausgeht, wurde hier eine Person von 40 Jahren als Referenz angenommen.

Für den betrachteten Fall des vermessenen VR-HMDs ergibt sich daraus eine altersangepasste BLH-gewichtete Strahldichte $L_{B,12}$ von $0,2774 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$, die ebenfalls erheblich geringer ist als der Grenzwert L_B von $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$.

Für den Prototypen von [1] läge die BLH-gewichtete Strahldichte eines 12-jährigen Kindes $L_{B,12}$ bei ca. $11,39 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ im Gegensatz zu ca. $4,921 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ bei einem Erwachsenen. Dies entspricht einer Mehrbelastung von ungefähr 131 % für Kinder.

3 Fazit

Nach Anwendung aktueller Normen zur Bestimmung von Blue Light Hazard [2] [3] lässt sich festhalten, dass weder von verfügbaren VR-HMDs, noch von bekannten VR-HMD-Prototypen eine Blaulichtgefährdung für Erwachsene ausgeht. Bezüglich der Verträglichkeit von VR-HMDs für Kinder konnte gezeigt werden, dass trotz einer um mehr als das doppelte höheren BLH-gewichteten Strahldichte trotzdem selbst bei einem VR-HMD mit $6000 \text{ cd}/\text{m}^2$ keine Gefährdung zu erwarten wäre. Die zur Bestimmung der altersangepassten äquivalenten BLH-gewichteten Strahlungsdichten getroffenen Näherungen³ sollten dennoch durch genaue Daten ergänzt werden, damit eine detailliertere Betrachtung vorgenommen werden kann. Auf dem Markt befindet sich bspw. ein VR-Produkt, das speziell für Kinder ab 7 Jahren beworben wird. Ein Display ist dabei nicht enthalten und die Funktionsweise als VR-HMD wird durch das Einsetzen eines Smartphones erst ermöglicht. Da bereits Smartphones mit $1500 \text{ cd}/\text{m}^2$ [10] auf dem Markt sind, sollte hier eine weitere Betrachtung der möglichen Blaulichtschädigung vorgenommen werden. Unklar ist auch, ob die angegebenen Expositionsdauern für Kinder identisch zu Erwachsenen angenommen werden können oder ob sich die Reparaturmechanismen der Retina von denen eines Erwachsenen unterscheiden.

Für die geplanten Experimente zur Untersuchung der Wahrnehmung von Leuchtdichten, die mit Erwachsenen durchgeführt werden sollen, kann jedoch mit beliebigen Leuchtdichten, die momentan durch Displays oder selbst Projektoren erzeugbar sind, gefahrlos für Probanden und Versuchsbetreuende gearbeitet werden.

³ Es wurde von gleicher Augengeometrie ausgegangen, obwohl Kinder im betrachteten Alter von 12 Jahren noch im Wachstum sind. Variiert wurden lediglich die spektralen Transmissionsgrade des Augenmediums.

4 Wiedergabe von nicht darstellbaren Leuchtdichten auf VR-HMDs

Trotz der im vorherigen Kapitel 3 betrachteten Extremfälle, sind die heutzutage verbreiteten VR-HMDs nicht in der Lage, höhere Leuchtdichten als ca. 250 cd/m^2 wiederzugeben. Dabei muss noch beachtet werden, dass sich eine solche maximale Leuchtdichte nur durch die Darstellung eines komplett weißen Bildes erzeugen lässt. Das am Fachgebiet vorhandene VR-HMD ist in diesem Fall sogar lediglich auf 146 cd/m^2 beschränkt. Hinzu kommt noch die Notwendigkeit das Display zu kalibrieren, damit sichergestellt werden kann, dass Farbörter über mehrere Experimente hinweg – die eventuell mit unterschiedlicher Hardware durchgeführt werden – konstant dargestellt werden können. Eine Kalibrierung geht wiederum mit einem Verlust der maximalen Leuchtdichte einher. Genauso wird jede dargestellte Szene ebenfalls weniger Leuchtdichte vorweisen als ein weißes Bild.

Trotz dieser Einschränkungen werden in der VR dargebotene Szenen als „echt“ empfunden, und Versuche zur Wahrnehmung des gleichen Ortes in der Realität und der VR zeigen, dass Probanden dabei ähnliche Empfindungen haben [11].

Bei der Betrachtung von Szenen mit Tageslicht stellt sich jedoch die Frage, ob die empfundene Echtheit einer virtuellen Szene durch eine dynamische Belichtung der virtuellen Kameras verbessern lässt, die die beiden Bilder für die Augen des Probanden erzeugen. Das Auge selbst besitzt mehrere Adaptationsmechanismen als Reaktion auf unterschiedliche Leuchtdichten, während der eigentliche Prozess der Adaptation von einem Menschen nur wahrgenommen wird, wenn er bewusst darauf achtet.

Wird eine Szene mit Tageslicht dargeboten, muss der Dynamikbereich der Bilder zwangsläufig beschränkt werden, da die tatsächlichen Leuchtdichten nicht dargestellt werden können. Eine Kompression der Helligkeitsdynamik wird Tone Mapping genannt und ist seit der zunehmenden Etablierung von Inhalten mit hoher Dynamik (*High Dynamic Range, HDR*) mehr in das Interesse von Forschergruppen gerückt.

So wurde bspw. in [12] ein konventionelles 2D-Display mit einem Eye-Tracker gekoppelt, der als Steuerung eines adaptiven Tone Mapping-Algorithmus fungierte, um HDR-Bilder darzustellen. Ein ähnlicher Ansatz soll für einen zukünftigen Probandenversuch gewählt werden:

Nach dem Vorbild des bei [12] beschriebenen Algorithmus soll adaptives Tone Mapping mittels Eye-Tracker in die Virtual Reality übertragen werden. Dieses Verfahren soll mit dem Versuch konstante Kontraste (im Rahmen der technischen Möglichkeiten) zu erzeugen, verglichen werden. Eine weitere Gruppe soll die Inhalte ohne spezielles Tone Mapping, lediglich mit Standard-Einstellung der verwendeten Game Engine betrachten, während alle Gruppen zur visuellen Qualität und ihrem Eindruck von Tageslicht befragt werden sollen.

Durch die Klärung der Frage, ob es eine potenzielle Blaulichtgefährdung durch VR-HMDs mit maximalen Leuchtdichten bis zu 6000 cd/m^2 gibt, können bzgl. des weiteren Vorgehens zur Untersuchung unterschiedlicher Verfahren des Tone Mappings in der Virtual Reality verschiedene Wege eingeschlagen werden. Sollten bspw. keine konstanten Kontraste umsetzbar sein, könnte ein weiterer Versuch mittels selbstgebautes VR-HMD basierend auf einem Videomonitor für Außenaufnahmen mit ca. 3500 cd/m^2 durchgeführt werden.

Nachdem die beste Variante zum Umgang mit den zu geringen darstellbaren Leuchtdichten ermittelt wurde, sollen drei verschiedene Szenarien miteinander verglichen werden. Ein vorhandener Spezialversuchsraum für die Tageslichtforschung soll in der Realität und in seiner digitalen Repräsentation miteinander verglichen werden. In der realen Umgebung sollen sich Probanden einerseits völlig frei und andererseits mit einer Dummy-VR-Brille im Raum bewegen können, die versucht so viele Parameter des VR-HMDs wie möglich, nachzubilden. Darunter zählen u.a. das eingeschränkte Gesichtsfeld, Flicker und der sog. Fliegengittereffekt, der durch zu geringe Pixeldichten des Displays auftritt. Dadurch ließe sich der Einfluss des Displays bzgl. der eingeschränkten Leuchtdichte gänzlich umgehen, während alle anderen Parameter weitestgehend erhalten blieben.

Die gleiche Szene soll auch in der VR mit dem zuvor ermittelten geeignetsten Tone Mapping-Verfahren dargeboten werden, während sich die Versuchsperson im tatsächlichen Raum befindet. Dabei soll die maximale Leuchtdichte, wie in Tab. 3 dargestellt, variiert werden.

Tab. 3: Maximale Leuchtdichten in cd/m^2 der zu untersuchenden Szenen

Reale Umgebung	Dummy-HMD	Virtual Reality
140	140	140
700	700	140
1400	1400	140
2100	2100	140

Die hier gezeigten Leuchtdichten sind jeweils ganzzahlige Vielfache der maximalen Leuchtdichte des vorhandenen VR-HMDs und werden ebenfalls in einem weiteren Vorversuch genauer ermittelt, wobei zunächst festgestellt werden soll, ab welcher Schwelle die Probanden einen Unterschied bemerken. Dadurch soll geklärt werden, wie die Simulation von Tageslicht bei geringeren Leuchtdichten als in der Realität, wahrgenommen wird.

5 Literatur

- [1] Douglas R. Lanman. (2020). Display Systems Research at Facebook Reality Labs (Conference Presentation). Proc. SPIE 11310. Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR). 1131025. 10.1117/12.2566597
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation, Health Physics: July 2013 - Volume 105 - Issue 1 - p 74-96
10.1097/HP.0b013e318289a611
- [3] IEC 62471 CEI/IEC 62471:2006. Photobiological safety of lamps and lamp systems. 2006-07-26
- [4] Schierz, Christoph. (2015). Fachexpertise zu Bildschirmen - Gibt es Gefährdungen der Netzhaut durch LED-hinterleuchtete Monitore? Zeitschrift LICHT 10/2015, S. 80-83
- [5] <https://developer.vive.com/resources/vive-sense/hardware-guide/vive-pro-eye-specs-user-guide/>
Aufgerufen am 17.05.2021
- [6] Baer, Barfuß, Seifert. (2016). Beleuchtungstechnik Grundlagen, 4. Auflage, Huss-Medien, ISBN 978-3-341-016343, Berlin
- [7] Point, Sébastien. (2018). Blue Light Hazard: Are exposure limit values protective enough for newborn infants?. Radioprotection. 53.
10.1051/radiopro/2018025.
- [8] Read, Scott & Collins, Michael & Vincent, Stephen. (2015). Light Exposure and Eye Growth in Childhood. Investigative Ophthalmology & Visual Science. 56. 6779-6787. 10.1167/iovs.14-15978.
- [9] Kraats, Jan & Norren, Dirk. (2007). Optical density of the aging human ocular media in the visible and the UV. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision. 24. 1842-57. 10.1364/JOSAA.24.001842.
- [10] <https://www.xda-developers.com/galaxy-s21-ultra-display-review/>
Aufgerufen am 17.05.2021
- [11] Chamilothoni, Kynthia & Wienold, Jan & Andersen, Marilynne. (2018). Adequacy of Immersive Virtual Reality for the Perception of Daylit Spaces: Comparison of Real and Virtual Environments. LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America. 15.
10.1080/15502724.2017.1404918.
- [12] Mantiuk, Radoslaw & Markowski, Mateusz. (2013). Gaze-Dependent Tone Mapping. Lecture Notes in Computer Science. 7950. 426-433. 10.1007/978-3-642-39094-4_48.