

DAS VR-HEADSET ALS DIGITALER KANAL

LIMITATIONEN DER HEUTIGEN VR-TECHNIK FÜR DAS DIGITAL STORYTELLING ERKENNEN UND INTELLIGENT VERMEIDEN

NIKOLAUS HOTTONG, ROBERT DÖHLER, FRANK HOFMEYER

VR-Headsets haben derzeit noch nicht vollständig Einzug in den Digital Mainstream gefunden, sind aber für technikaffine Zielgruppen im Industrie- und Kulturbereich ein gern genutzter digitaler Kanal. Aus konzeptioneller und produktionstechnischer Sicht muss dabei beachtet werden, dass insbesondere die visuelle Immersion im Wesentlichen auf displaybasierten, stereoskopischen „Tricks“ fußt, die beim Storytelling und der Interaktion berücksichtigt werden müssen. Vier Aspekte sollen hier prototypisch am Beispiel eines weitverbreiteten VR-Headsets (HTC-Vive) diskutiert werden.

➤ VR headsets have not yet fully found their way into the digital mainstream, but are a popular digital channel for technology-savvy target groups in industry and culture. From a conceptual and production point of view, it must be borne in mind that visual immersion in particular is essentially based on display-based, stereoscopic “tricks” that have to be taken into account during storytelling and interaction. Four aspects will be discussed prototypically using the example of a widespread VR headset (HTC-Vive).

1. Aufbau und Technik eines VR-Headsets im Jahr 2018

Bei der Perzeption von VR-Inhalten spielt, neben den Controllern, das zum Einsatz kommende VR-Headset (*Head Mounted Display, HMD*) eine essentielle Rolle – insbesondere in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung und die damit einhergehende Qualität der Erfahrung. Aus diesem Grund ist es für VR-Produzenten unabdingbar, sich der optischen und physikalischen Eigenschaften eines HMD bewusst zu werden. Grundlegend besitzen alle HMDs den gleichen technischen Aufbau: Der Nutzer betrachtet durch ein Paar Linsen ein einzelnes oder zwei separierte Displays, durch welche er ein stereoskopisches Bild im Side-by-Side Renderverfahren zu sehen bekommt. Qualitative Unterschiede zwischen einzelnen Herstellern lassen sich vorwiegend auf die verwendete Tracking-Technologie und die Güte der verbauten Einzelteile, wie beispielsweise die Linsen und Displays, zurückführen.

Im Rahmen einer Untersuchung analysierten wir das VR-Headset *HTC Vive*, welches aus einer Kooperation zwischen den Firmen Valve und HTC heraus entwickelt wurde und seit April 2016 offiziell im Handel verfügbar ist. Seither zählt die Brille zu einer der populärsten VR-Brillen im professionellen Bereich. Das Gerät wurde innerhalb der Untersuchungen in seine einzelnen Bestandteile zerlegt, analysiert und vermessen, um mehr über die eingesetzte Technik zu erfahren. Vorab jedoch ein kurzer Blick auf die offizielle Eckdaten des Herstellers: ¹⁾

Bildschirm:	Dual AMOLED 3,6“ diagonal
Auflösung:	1080 x 1200 Pixel pro Auge
Bildwiederholrate:	90 Hz
Sichtfeld (FoV):	110 Grad, horizontal

Ein mechanischer Teardown des Geräts ist mit handelsüblichen Werkzeugen möglich, sollte jedoch mit Vorsicht durchgeführt werden, um keine der sensiblen Bestandteile zu zerstören. Dabei kann das Herzstück – die Linsen und Displays – genauer unter die Lupe genommen werden. Die dicken Fresnellinsen haben einen Durchmesser von 50 mm und kommen jeweils auf eine Brennweite von ca. 35 mm bei einem Abstand von 3 mm zwischen ihren Hauptebenen. Die Linsen sind in eckige Halterungen eingelassen, welche den Abstand zum Display fixieren.

Die Tiefe dieser Halterung liegt bei 34,3 mm und kommt somit nahe an die Brennweite der Linsen heran, was eine deutliche Fernprojektion der Displays nahelegt. Ergänzend konnte zudem im Echtzeit-Renderer eine stereoskopische *Zero-Parallax-Plane* bestimmt werden, welche in 30 Metern Entfernung liegt. Kombiniert man diese Fakten mit dem Öffnungswinkel des Headsets ergibt sich insbesondere für Content-Produzierende folgende sinnvolle Vereinfachung: im HMD wird dem visuellen System des Nutzers die VR vermittelt, als sähe er/sie auf eine 53 m x 60 m große, virtuelle S3D-Leinwand in einer Entfernung von ca. 30 m, welche sich permanent mit dem Kopf des Betrachters mit dreht (s. a. Bild 7).

Es besteht im Headset die Möglichkeit, mithilfe eines Drehrädchens den horizontalen Abstand der Linsen und



Bild 1 a/b. Geöffnetes Headset, Ausmaße der Linsen/Display-Halterung sowie des Linsendurchmessers (alle Bilder: die Autoren)

¹⁾ HTC Corporation: <https://www.vive.com/de/product/#vive-spec> (Zuletzt aufgerufen am: 05.06.2019)



Bild 2. Vergleich zwischen der softwaregenerierten Bildvorschau und der vorverzerrten Präsentation auf den Displays

damit der Displays an den Augenabstand des Nutzers anzupassen. Die jeweils vom Zentrum der Linsen durchgeführten Messungen ergaben, dass der Linsenabstand in einem Bereich von 61,2 mm bis 74,4 mm regelbar ist. Diese Werte liegen im oberen Anschlag deutlich über dem Mittelwert von westlichen Männern und Frauen [1]. In Zuge unserer Tests ergab sich aber, dass im unteren Bereich bei 13 % der Probanden (vornehmlich weiblich) ihr faktisch kleinerer Augenabstand mit dem Headset nicht korrekt angepasst werden konnte.

Der Teardown ermöglichte ein weiteres Experiment: Den partiellen Displaybetrieb im ausgebauten Zustand. Auf diese Weise können die gerendert Bildinhalte so beobachtet werden, wie sie tatsächlich auf den Displays angezeigt werden. Dadurch kann festgestellt werden, dass das Vorschaubild der verwendeten Steam-Software nicht exakt mit der tatsächlichen Display-Präsentation übereinstimmt. Es ist zu erkennen, dass das Bild einer tonnenförmigen geometrischen und einer chromatischen Vorverzerrung unterliegt, um die Beugungseffekte der dicken Fresnellinse ausgleichen. Wobei Ersteres den effektiven Darstellungsbereich geringfügig einengt. Die Phänomene sind in Bild 2 zu beobachten.

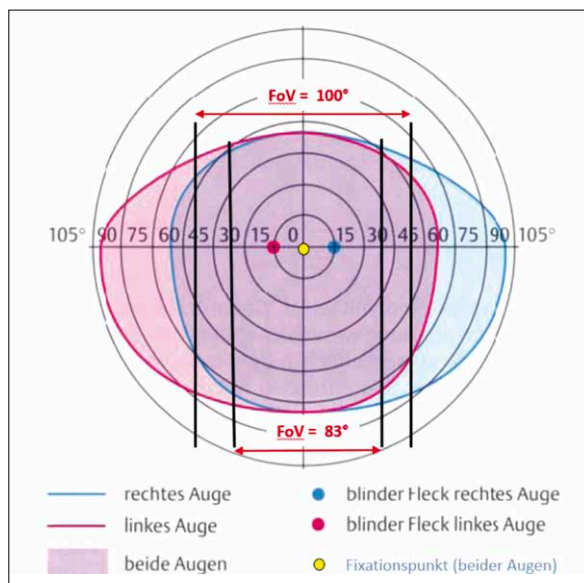


Bild 3. Das tatsächlich nutzbare horizontale Sichtfeld der HTC-Vive an dem des menschlichen Gesichtsfelds veranschaulicht. Zeichnung in Anlehnung an [17]

Insgesamt kann der Wert von 110° horizontalem FoV in der praktischen Nutzung nicht eingehalten werden, da zusätzlich – je nach Abstand zwischen Augen und Linsen – das Sichtfeld des Nutzers weiter eingeschränkt wird. Keine unserer empirisch durchgeführten Messungen konnte einen effektiven FoV-Wert von 110° erzielen. Dieser pendelte sich – je nach Einstellung der Kopfhalterung (Abstand Kopfpolster – Linsen) – in einem Bereich zwischen 83° und 100° ein. Eine Winkelminute im horizontalen FoV entspricht somit zwischen 0,22 und 0,33 Pixeln, was die Äußerungen vieler Nutzer über eine eher grob wahrgenommene örtliche Auflösung bekräftigen.

2. Einfluss von Kalibration und Raumskalierung auf die VR-Raumwahrnehmung

Im vorherigen Abschnitt wurde schon auf zwei systemtechnische Einschränkungen aktueller VR-Headsets eingegangen nämlich die zu grobe örtliche Auflösung der Displays und das – im Vergleich zum natürlichen Sehen – technisch eingeschränkte Sichtfeld. Zudem kann bei Nutzern das Phänomen der Cyber-Sickness auftreten, welches häufig dann vorkommt, wenn visuelle Weltbewegungen im Gegensatz zur körperlich wahrgenommenen Beschleunigung des Users stehen. Beispielsweise, wenn auf einem ruhigen Stuhl sitzend an einer inszenierten VR-Achterbahnfahrt teilgenommen wird. Hier handelt es sich um ein generelles VR-Designproblem [2, S. 56], welches aber schon in der Konzeptionsphase des digitalen Storytellings berücksichtigt werden kann (und sollte).

Näher eingehen möchten wir auf angebliche Diskrepanzen in der Perspektivwahrnehmung von VR-Nutzern sowie der Größen- und Distanzeinschätzung in VR-Anwendungen, von denen insbesondere in Architektur-Anwendungen berichtet wird [2, S. 52], [3]. Hier muss auf Anwenderseite insbesondere verstanden werden, welche Einstellungen an Headset und Software diese Fehlwahrnehmungen fördern bzw. – positiv gesprochen – eliminieren können. Dazu zählen folgende Faktoren:

- Die produktionsseitig korrekte Skalierung der VR-Welt, inkl. einer realistischen Texturierung.
- Geringe Latenz zwischen Körperbewegungen und visuellem Feedback im Headset.
- Ein exakt kalibriertes Raumtracking.
- Ein exakt kalibriertes Höhentracking des Headsets, welches den VR-Renderprozess korrekt auf die individuelle Körpergröße/Augenhöhe des Users ausrichtet (keine „Untersicht“ oder „Übersicht“ des Nutzers).
- Die individuelle Anpassung des Linsenabstands im Headset auf den jeweiligen Augenabstand des Benutzers (korrekte stereoskopische Tiefenwahrnehmung).

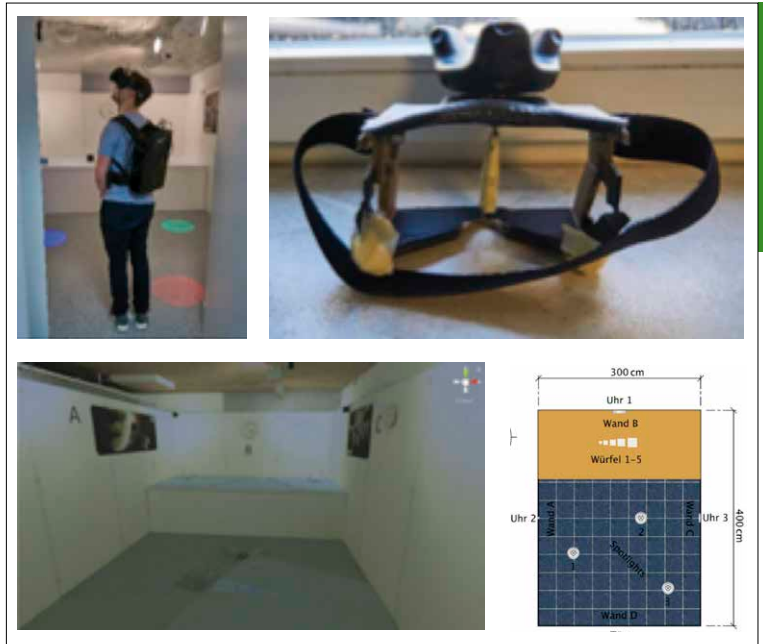
Allein die konsequente Beachtung dieser fünf Kriterien scheint schon wesentliche Fehlwahrnehmungen der Raumdimension zu eliminieren, wie [3] und ein größerer Probandentest unsererseits nahelegt. Dazu wurde ein realer Raum (den kein Proband kannte) mit einem 3D-Laserscanner hochaufgelöst abgetastet und in hoher Realitätsnähe in einer VR-Anwendung implementiert. Die Probanden mussten, das Headset tragend, sich durch den realen Raum bewegen und folgende Aufgaben bewältigen:

- Die Entfernung der Eigenposition zu einer festgelegten Tischkante schätzen.
- Sich im Zentrum von drei verschieden-farbigem Lichtkegeln korrekt positionieren.
- Die Uhrzeiten auf verschieden großen Uhren an den Wänden ablesen

• Die Größe eines realen Würfels durch Tasten bestimmen und einem virtuell betrachteten Würfel zuordnen. Die Probanden wurden bezüglich ihrer relativen und absoluten Raumbewegungen sowie ihrer Augenbewegungen vollständig getrackt und mit einer demografisch und in der Medienaffinität weitestgehend identischen Vergleichsgruppe abgeglichen, welche die exakt gleichen Aufgaben im realen Raum zu absolvieren hatte. Dabei wurde allen Real-Probanden zur Vergleichbarkeit ebenfalls das Blickfeld mit einem leeren Cardboard-Gestell auf ca. 100° eingeschränkt.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen exakten Systemkalibration und der individuellen Anpassung des Headsets auf den Augenabstand der Probanden ergaben sich folgende Erkenntnisse (23 VR-Probanden, 18 Real-Probanden in der Altersspanne 18–29 Jahre, t-Test für unabhängige Stichproben, kritischer t-Wert = 2,0–2,55, Signifikanzniveau = 0,05 sowie Mann-Whitney U-test für die Würfelgrößenschätzung):

Die statistische Datenanalyse dieses Test szenarios zeigt, dass es keine signifikanten Unterschiede in der Raumwahrnehmung zwischen Real- und VR-Probanden gibt. Zwar gibt es im Einzelnen kleine Unterschiede in den zentralen Tendenzen, doch sind diese zu gering, sodass sie aus sta-



Bilder 4a-d. Eingesannter Raum, Aufgaben-Setup, VR-Proband und leeres Cardboard-Gestell der Real-Probanden (alle Bilder: die Autoren)

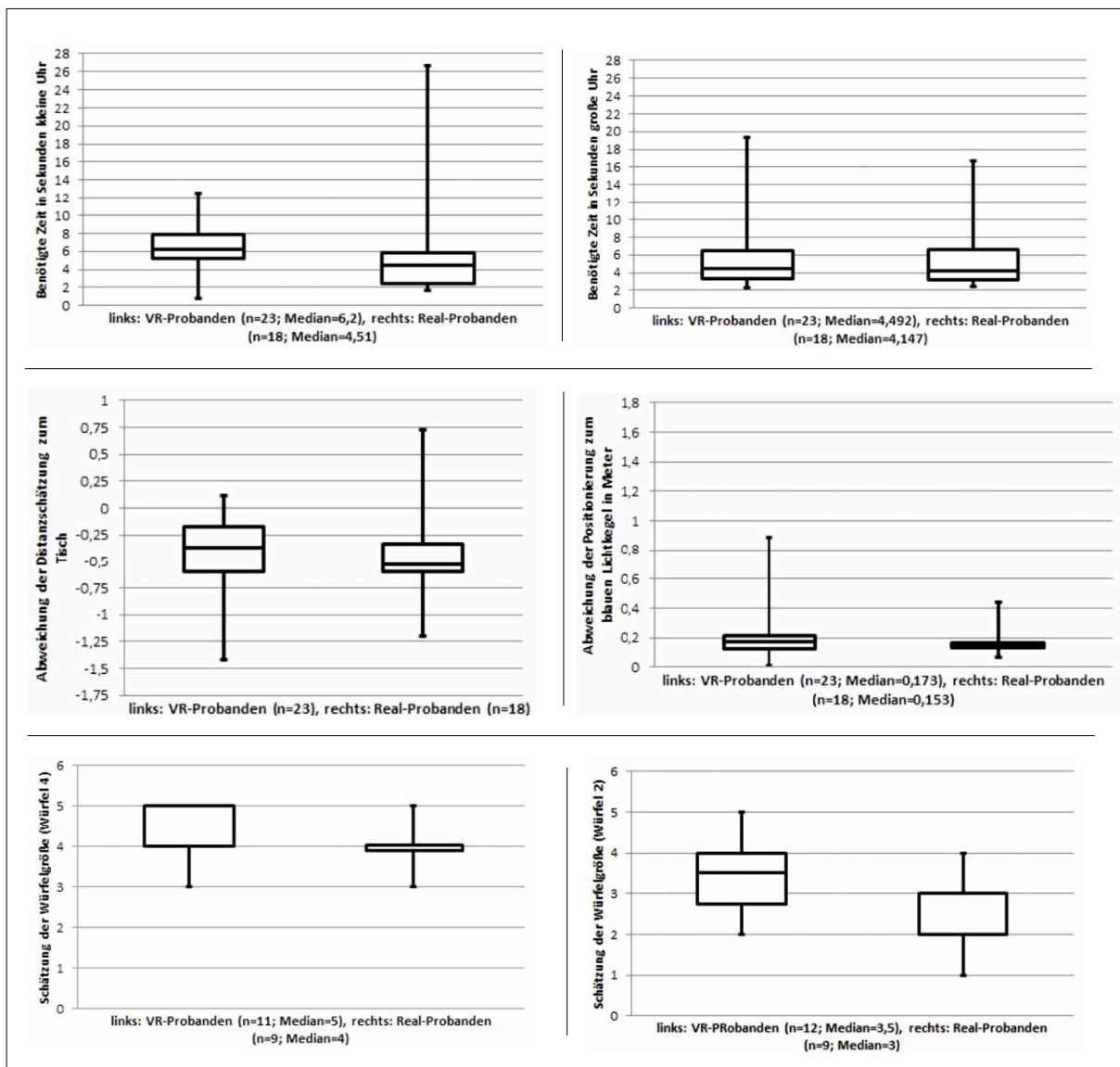


Bild 5. Ergebnisse des Vergleichstest VR-Raumwahrnehmung vs. reale Raumwahrnehmung bei exakter Kalibration und individuell angepasstem Headset (Linsenabstand = Augenabstand)

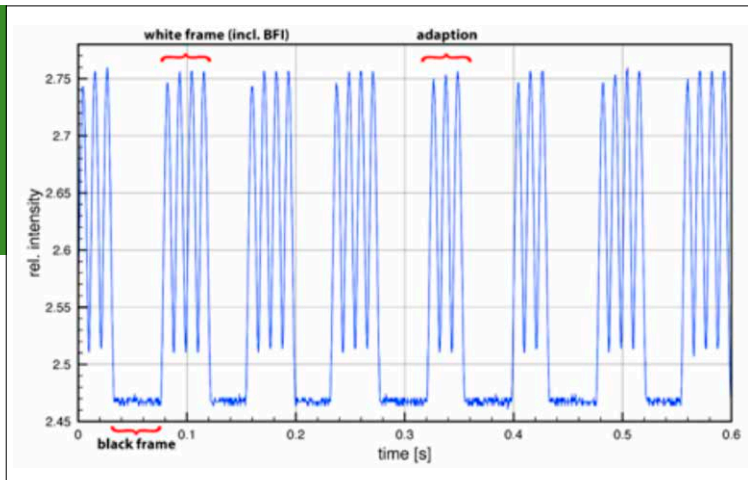


Bild 6. Darstellung eines Videos mit 25 B/s (fps) auf der HTC Vive Pro. Das Video besteht teilweise abwechselnd aus schwarzen und weißen Einzelframes. Deutlich ist die variierende Framelänge zu sehen.

tistischer Sicht irrelevant sind. Zusätzlich zeigt ein Mittelwerttest in beiden Gruppen auf, dass VR- und Real-Probanten die Distanz zum Tisch gleich schlecht geschätzt haben. In einer Korrelationsanalyse zeigte sich ergänzend, dass die Abweichung der Distanzschätzung der VR-Probanten nicht von der jeweiligen Distanz des Probanden zum Tisch abhängt. Mithilfe einer Fragebogenauswertung konnte ergänzend festgestellt werden, dass die VR-Probanten ihrem Szenario ein hohes Präsenzgefühl sowie eine hohe Immersion attestierten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass *in dieser Testanordnung* keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Raumwahrnehmung zwischen VR- und Real-Probanten feststellbar waren.

3. Einfluss der Displayelektronik auf die VR-Bewegungswahrnehmung

Auch die Bildwiederholrate der Displays und die damit korrelierte menschliche Flimmerfusionsfrequenz sollte von Produzenten berücksichtigt werden. Die Flimmerfusionsfrequenz (engl.: *Critical Fusion Frequency*, CFF) beschreibt die Frequenz, bei der schnell intermittierend dargebotene Lichtreize vom menschlichen visuellen System nicht mehr als Flimmern, sondern als ein kontinuierlicher Lichtreiz wahrgenommen wird. Im Bereich skotopischer Reizstärken (niedriger Lichtintensität) liegt die maximale CFF bei 22–25 Hz. Im photopischen Bereich (höhere Lichtintensität) steigt

die CFF allerdings mit dem Logarithmus der Lichtintensität (Ferry-Porter-Gesetz) und abhängig von der Flächenverteilung der Lichtintensität (Granit-Harper-Gesetz) auf 80–90 Hz an. Vgl.: [4], [5].

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass wahrnehmbares Großflächenflimmern und Flackern während der Wiedergabe von VR-Inhalten die Quality of Experience (QoE) deutlich negativ beeinflusst. Vgl.: [6].

Erschwerend kommt im Vergleich zu Bildschirmen hinzu, dass die spezielle Betrachtungssituation bei in HMDs u.a. aufgrund der extremen Bildgröße (Sichtfeld) und der veränderten Helligkeitswahrnehmung eine erhöhte CFF zu provozieren scheint. Auch aus diesem Grund nutzen die meisten der derzeit verfügbaren VR-Headsets LCD- bzw. OLED-Displays mit einer festen Bildwiederholrate von 90 Hz. Damit ist es theoretisch möglich, die maximale CFF des Menschen abzudecken und ein Großflächenflimmern zu vermeiden. In der Praxis können sich jedoch – in Abhängigkeit vom produzierten Inhalt – trotzdem erhebliche Probleme ergeben: Bei der Erstellung von 360°-Filmen mit den bislang üblichen Videobildraten (25/30/50/60 fps) kommt es z.B. bei der Wiedergabe oft zu wahrnehmbaren Darstellungsproblemen (Flimmern, Flackern, Stottern). Dies hängt damit zusammen, dass die Bildwechselfrequenz des Contents vom Wiedergabesystem angepasst beziehungsweise interpoliert werden muss, um die vom Display vorgegebene Bildwiederholrate von 90 Hz zu erreichen. Wie in Bild 6 zu sehen, ergeben sich dadurch in Abhängigkeit vom verwendeten Gesamtsystem (Grafikkarte, Player, Decoder etc.) zum Teil erhebliche Artefakte aufgrund unregelmäßiger Bildwiedergabe und Black Frame Insertion (BFI). Zur Vermeidung dieser Artefakte könnte mit einer nativen Bildrate von 90 Hz produziert werden. Effizienter ist es jedoch, vor Auslieferung an die Kunden, die Interpolation der fertig produzierten Filme auf 90 Hz mit hochqualitativen Offline-Algorithmen durchzuführen. Dadurch lassen sich deutliche Qualitätsverbesserungen bei verhältnismäßig geringem Aufwand (Berechnungszeit) erreichen. Vgl.: [7], [8].

Im Bereich der VR-Echtzeit-Computergrafik ergibt sich das offensichtliche Problem, dass die jeweilige VR-Anwendung permanent mit 90 fps gerendert werden müsste, um die bestmögliche Darstellungsqualität ohne Flimmern oder Flackern zu erreichen. Dies stellt selbst für performante PCs eine nicht unerhebliche Herausforderung dar.

Aus diesem Grund bieten Firmen wie Oculus oder HTC Softwarelösungen an, welche in Echtzeit die Framerate der Renderpipeline überwachen und gegebenenfalls Zwischenbilder interpolieren. Sowohl *Asynchronous SpaceWarp* (ASW) von Oculus, als auch *Motion Smoothing* von HTC springen ein, sobald die Bildrate unter 90 fps sinkt. In diesem Fall wird die Bildrate im Renderer auf konstante 45 fps fixiert und für die Display-Darstellung künstliche Zwischenbilder berechnet. Dadurch soll stets eine flüssige Bildwiederholrate von 90 Hz gewährleistet sein. Tatsächlich kommt es jedoch immer wieder zu Interpolationsfehlern, da auch die Position des Nutzers sowie die Lage von sich bewegenden Objekten für die Zwischenbildberechnung mit einbezogen werden müssen. Letztlich müssen VR-Produzenten immer wieder abwägen, ob es nicht sinnvoller ist zugunsten einer konstanten Bildwiederholrate im HMD auf besonders rechenintensive visuelle Effekte zu verzichten.

4. Sonderfall: visuelle Wahrnehmung im Personal Space

Wie im ersten Abschnitt dargelegt, basiert die räumliche Illusion im untersuchten HMD im Wesentlichen darauf, dass

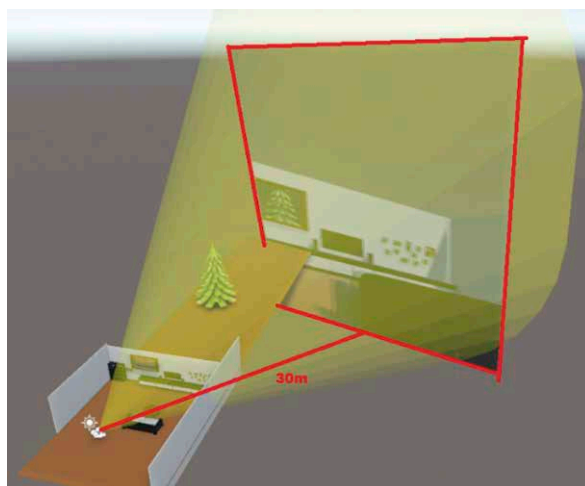


Bild 7. Verdeutlichung der stereoskopischen Illusion der virtuellen Welt durch Displays und Linsenprojektion im VR-Headset (kopffixierte S3D-Leinwand)

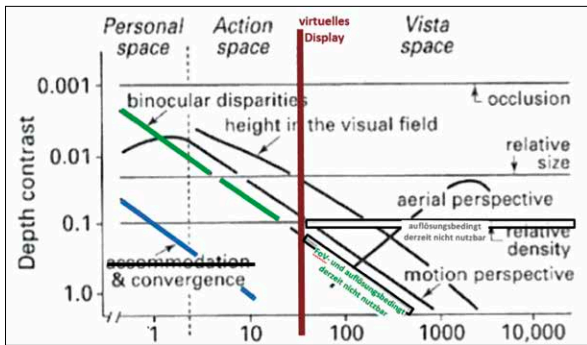


Bild 8. Einordnung der stereoskopischen HMD-Eigenschaften in Bezug zur natürlichen, visuellen Raumwahrnehmung des Menschen. Zeichnung in Anlehnung an [9]

zwei Displays über die optische Projektion der vorgelagerten Linsen dem visuellen System die VR-Welt vermitteln, als sähe es auf eine 53 m x 60 m große, virtuelle S3D-Leinwand in einer Entfernung von ca. 30 m, die sich permanent mit dem Kopf mit dreht. Dadurch entsteht bei den Nutzern das Gefühl der „Eingebettetheit“ (Immersion) und der virtuellen Präsenz. Dieser technische Kniff wird in Bild 7 nochmals visuell verdeutlicht.

Mit dieser Erkenntnis ergeben sich zwei klare Regeln für das digitale Storytelling in VR:

- VR-Elemente bis 30 m Entfernung inszenieren sich allein in *negativer stereoskopischer Parallaxe* aus der kopffixierten, virtuellen Leinwand heraus zum Nutzer hin (*Action Space, Personal Space*). Dies wurde durch Parallaxmessungen an den offenen Displays verifiziert.
- VR-Elemente jenseits 30 m Entfernung (*Vista Space*) werden nur monoskopisch inszeniert (entfernungsrichtige relative Größe, Verdeckung, atmosphärische Perspektive, etc.), was aber in etwa den räumlichen Wahrnehmungsfähigkeiten des Menschen entspricht.

In Bild 8 sind diese Erkenntnisse in ein Diagramm eingezeichnet, welches in Anlehnung an [9] die visuellen Raumwahrnehmungskomponenten des Menschen über die Entfernung zusammenfasst.

Insbesondere in dem für die Interaktion relevanten Personal space ergeben sich aus den bisherigen Erkenntnissen

weitere Usability-Konsequenzen. Dazu muss sich nochmals der Stereoskopie im Headset vergegenwärtigt werden: die Augen der Nutzer akkomodieren permanent auf eine Displayentfernung von ca. 30 m, wohingegen sich die Augenachsen – je nach Nähe/Entfernung der betrachteten Objekte – auf unterschiedliche Konvergenzwinkel eindreuen. Abhängig von seiner Distanz zu virtuellen Objekten wird der User also in Akkomodation/Vergenz-Konflikte geführt, die er/sie vom natürlichen Sehen her nicht kennt. Dieser Effekt ist vom tradierten S3D-Kino und von S3D-Gamedevices schon bekannt [10].

Eine Konsequenz daraus scheint offensichtlich im untersuchten VR-System (HTC Vive + Unity + Steam VR) implementiert zu sein:

- Kein VR-Nutzer kann sich näher als 30cm an ein virtuelles Objekt annähern bzw. damit interagieren.

Diese Entfernung wurde anscheinend in Unity bewusst als *Default Near Clipping Rendering Plane* definiert, um Irritationen in der stereoskopischen Nah-Sicht der User zu vermeiden. Testweise durchgeführte Gazetracking-Analysen von Probanden im Nahbereich (N=27, Objekt kommt auf Probanden zu und bewegt sich wieder weg) zeigen, dass diese z. T. schon ab 0,5 m Nahbetrachtung in Strabismus-ähnliche Seh-situationen geführt werden („schielen“). Das stereoskopische Konvergenz-zu-Akkommodations-Missverhältnis (C/A-Ratio: [m/m]) beträgt hier rechnerisch 1/60 und steigt mit zunehmender Betrachtungsnähe exponentiell an. Des Weiteren zeigt der Abgleich mit dem mechanisch-optischen Teardown des Headsets (s. Abschnitt 1), dass die Augenachsen der Nutzer in diesen Fällen nur noch sehr knapp über die nasalen Ränder der internen Fresnellinsen verlaufen. In wie weit dieses Sehverhalten bei der Interaktion mit Objekten im *Personal Space* (30–100 cm) zu visuellen Ermüdungserscheinungen führt, wird zum Entstehungszeitpunkt dieses Artikels in einem weiteren Probandentest an der Hochschule Furtwangen untersucht.

Zum Abschluss dieses Kapitels möchten wir noch auf die häufig gestellte Frage eingehen, ob es (im Sinne der Interaktion, der Usability bzw. des Storytellings) in VR möglich ist zu zoomen. Technisch gesehen lautet die Antwort klar „nein“, denn die derzeitig verwendeten, virtuellen Kameramodelle des stereoskopischen Echtzeitrenderings bzw. deren Transformationsmatrizen (*Model-View-Projection*) können keine

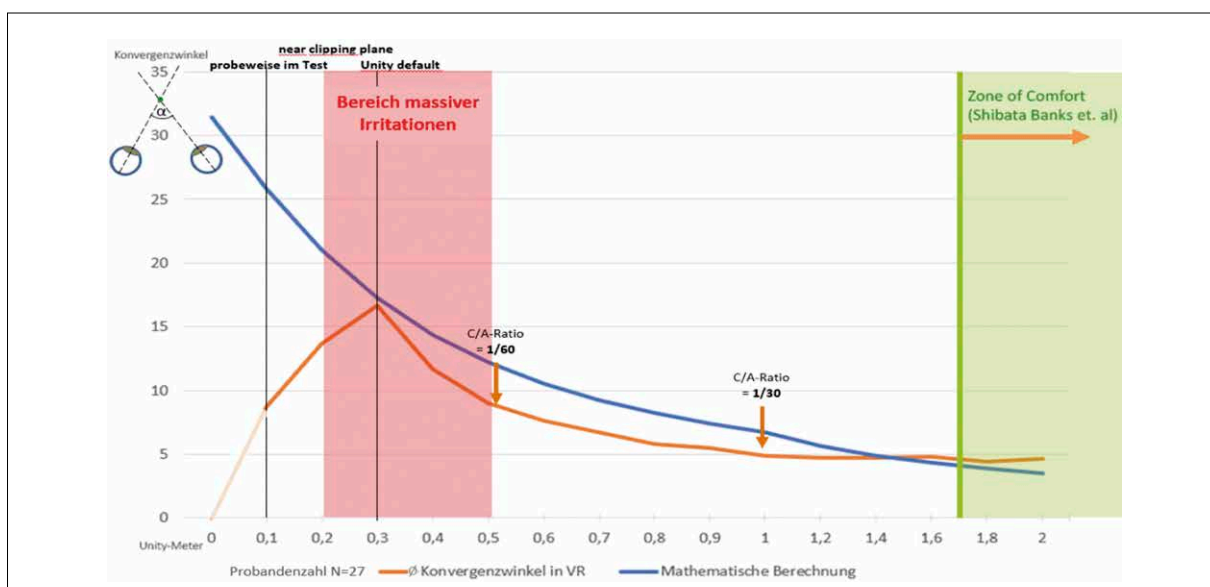


Bild 9. Eigene Messungen zur Okulomotorik und C/A-Ratio im untersuchten VR-Headset bei Nahbetrachtung von Objekten (alle Bilder: die Autoren)

Brennweitenänderungen bei gleichzeitiger Beibehaltung der Bilddimensionen/des Sichtfeldes realisieren. Auf der anderen Seite kann sich ein VR-Nutzer natürlich auf Knopfdruck zu jeder Zeit an entfernte Objekte heran-„teleportieren“ und sie dann (bis auf die oben beschriebene 30-Zentimeter-Grenze) näher betrachten.

5. Aktuelle Entwicklungen

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass derzeit einige Forschungsgruppen und Hersteller sich mit Lösungen für die von uns aufgezeigten Aspekte beschäftigen. Zwei Hersteller aus dem Profibereich [11], [12] bieten laut Produktbeschreibung derzeit schon Sichtfelder von 180–200° mit erhöhter örtlicher Auflösung der Displays an. Problematisch erscheint allerdings die damit einhergehende Gewichtszunahme des Headsets. Ein Hersteller [13] bietet bei eher konservativer Auflösung von 1440 x 1600 px pro Display Bildwiederholraten von 120 Hz (sowie „experimentell“ 144 Hz). Forscher in USA bauten testweise Headsets mit varifokalen Linsen [14]. Und da viele VR-Headsets mittlerweile mit integriertem Eyetracking ausgerüstet sind, wird zusätzlich untersucht, aus Performancegründen nur diejenigen Displaybereiche scharf zu rendern, die augenblicklich nur scharf wahrgenommen werden können (*Foveated Rendering*) [15] bzw. auf denen höchstwahrscheinlich die visuelle Aufmerksamkeit der User gerichtet ist (*Saliency-Based-Rendering*) [16].

Ob und welche dieser Entwicklungen letztendlich Einzug in den Mainstream halten, kann aus Sicht der Autoren derzeit nicht abgeschätzt werden. Wer heute VR als digitalen Kanal einsetzen möchte, kann aber – im Wissen um die beschriebenen Effekte – oft durch ein intelligentes Content- und

Interaktionsdesign die beschriebenen Hürden berücksichtigen bzw. vermeiden und somit eine gute User-Experience und ein visuell-ermüdungsfreies VR-Storytelling gewährleisten. ◀

Die Autoren bedanken sich ausdrücklich bei Konstantin Kaiser, Fabian Haubrichs und Adrian Vögtle (Projekt HVA_Xplore II) sowie Corinna Braun, Felix Knoop und Florian Neuweiler (Projekt DEV_space) für die Mitarbeit an den Untersuchungen und den Auswertungen.

Literatur

- [1] Dodgson, N. (2004): Variation and extrema of human inter-pupillary distance, In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Syst XI*. 5291. 36–46.
- [2] Dörner, R. et al (2013): *Virtual und Augmented Reality (VR / AR)*; 1. Auflage, Springer Vieweg, S. 52 & 56
- [3] Interrante V, Anderson L, Ries B (2006) Distance perception in immersive virtual environments, revisited. In *Proc IEEE Virtual Reality 2006*, 3–10.
- [4] H. Baatz, P. Raak, D. de Ortueta, A. Mirshahi, G. Scharioth (2010): Praktische Bedeutung der Flimmerfusionsfrequenz (CFF), In: *Der Ophthalmologe* 8, 2010 S. 715–719. Springer Verlag Heidelberg.
- [5] Schmidt, Lang, Heckmann (2010): *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie* – 31. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 2010, S. 366
- [6] Hofmeyer, F.; Fremerey, S.; Cohrs, T.; Raake, A. (2019): Impacts of internal HMD Playback Processing on Subjective Quality Perception; *Human Vision and Electronic Imaging (HVEI) 2019*, Burlingame (California, USA), January 2019
- [7] Fremerey, S.; Hofmeyer, F.; Göring, S.; Raake, A. (2019): Impact of Various Motion Interpolation Algorithms on 360° Video QoE. *Eleventh International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) 2019*.
- [8] Introducing SteamVR Motion Smoothing Beta (2018) <https://steamcommunity.com/games/250820/announcements/detail/1696061565016280495>
- [9] Cutting, James E.; Vishton, Peter M. (1995), Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In: William Epstein und Sheena J. Rogers (Hg.): *Perception of space and motion*. San Diego: Academic Press (*Handbook of perception and cognition* (2nd ed.)), S. 69–117.
- [10] Shibata, Takashi et al. (2011): The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. In: *Journal of Vision* (11/8), S. 1–29.
- [11] <https://pimaxvr.com/products/8k>
- [12] <https://vrgineers.com/de/xtal/>
- [13] <https://www.valvesoftware.com/de/index>
- [14] K. Aksit et al. (2017), Varifocal Virtuality: A Novel Optical Layout for Near-Eye Display, *SIGGRAPH '17 Emerging Technologies*, July 30–August 03, 2017, Los Angeles, CA, USA
- [15] Anjul Patney, et.al. (2016), Perceptually-Based Foveated Virtual Reality, *SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, July 24–28, 2016, Anaheim, CA,
- [16] De Abreu, Ana et al. (2017), Look Around You: Saliency Maps for Omnidirectional Images in VR Applications, *Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) 2017*.
- [17] Ware, Colin (2013): *Information visualization : perception for design*; 3rd edition, Morgan Kaufmann, Figure 2.18

Bild: Nikolaus Hottong



PROF. NIKOLAUS HOTTONG

lehrt das Fachgebiet Medientechnologien an der Hochschule Furtwangen/ Fakultät Digitale Medien.

◀ www.hs-furtwangen.de

Bild: Robert Döhler



ROBERT DÖHLER

hat den Abschluss Medieninformatik M.Sc. an der Hochschule Furtwangen absolviert und ist freiberuflicher Softwareentwickler für interaktive und immersive Anwendungen.

Bild: Frank Hofmeyer



FRANK HOFMEYER, M.SC.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Medientechnik der TU Ilmenau.

◀ www.tu-ilmenau.de