

Perzeptionelle Modellierung für stereoskopische 3D¹

Petr Kellnhofer²

Abstract: Anwendungen von virtueller und erweiterter Realität verwenden in der Regel eine stereoskopische Darstellung und schließen intensive Objekt- und Betrachterbewegung ein. Die Integration von hohen Dynamikumfangen stellt eine weitere erstrebenswerte Funktionalität dar. Meine Dissertation beschäftigt sich mit den komplexen Wechselwirkungen zwischen all diesen visuellen Wahrnehmungselementen. Wir beschreiben die Einschränkungen aktueller Bildschirmtechnologien und überwinden sie, indem wir Wahrnehmungsmodelle zusammen mit unseren eigenen Studien verwenden, um den Betrachterkomfort zu steigern, die wahrgenommene Tiefe zu verstärken und visuelle Artefakte zu reduzieren. Die Dissertation ist zweigeteilt, um sich getrennt voneinander sowohl mit dynamischer Bewegung als auch mit hohen Dynamikumfangen in Wechselwirkung mit stereoskopischem 3D zu beschäftigen. Eine einheitliche Forschungsmethodologie und algorithmischen Herangehensweise zieht sich hingegen durch den gesamten Text.

1 Einführung

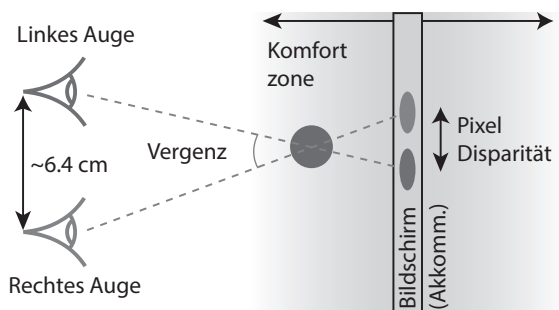


Abb. 1: Die Grundprinzipien der stereoskopischen Darstellung und des Vergenz-Akkommodation-Konflikts, der die reproduzierbare Tiefe auf aktuellen Geräten limitiert.

Stereoskopisches 3D hat sich inzwischen als ein wichtiger Bestandteil in der digitalen Bilderzeugung, in Computerspielen und in der Filmproduktion etabliert. Dies wiederum hat auch intensive Forschungsbemühungen hervorgerufen, den Eindruck der Tiefenwahrnehmung zu verbessern. Ein besseres Verständnis der Einschränkungen von 3D Bildschirmen und dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen hat den Weg zu einer intelligenteren Verarbeitung der Inhalte geebnet. Üblicherweise bereitet stereoskopisches 3D einige Probleme, wenn es auf aktuellen Geräten dargestellt wird. Das Unbehagen, das durch Rivalität der beiden Ansichten oder übermäßig große Disparitäten zusammen mit dem sogenannten Vergenz-Akkommodation-Konflikt (Abb. 1) ausgelöst wird, kann leicht die

¹ Englischer Titel der Dissertation: "Perceptual modeling for stereoscopic 3D"

² Universität des Saarlandes und Max-Planck-Institut für Informatik, pkellnho@mpi-inf.mpg.de

Vorteile der binokularen Wahrnehmung schmälern, Ermüdungserscheinungen hervorrufen und folglich dazu führen, dass das Betrachten in althergebrachtem 2D bevorzugt wird [La09]. Die Modellierung der Wahrnehmung des menschlichen Sehsystems (HVS) ist eine Möglichkeit, um sowohl Inhalte im Hinblick auf die beste Betrachtererfahrung für ein allgemeines Publikum zu optimieren, als auch spezifische Eigenschaften eines Geräts zu berücksichtigen oder auf individuelle Betrachter abzustimmen. Wir verwenden Wahrnehmungsstrukturen, um neue Herausforderungen in modernen Multimedia-Systemen anzugehen [Ke16a]. Head-Mounted Displays (HMD) für virtuelle Realität (VR) und erweiterte Realität (AR) sind ein Beispiel für solche Geräte. Sie verwenden ein stereoskopisches Display zusammen mit einem Tracking des Benutzers für direkte Bewegungsinteraktion. Bildschirme mit hohem Dynamikumfang (HDR) sind eine weitere spannende Innovation, die den Verbrauchermarkt erreicht, und können potentiell ebenfalls in HMDs eingebaut werden. Die Dissertation untersucht Wechselwirkungen von stereoskopischem 3D sowohl mit Bewegung als auch mit HDR, und ist entsprechend in zwei Teile gegliedert. Wir zeigen, wie sich die Eigenschaften des HVS unter Bewegung oder einem hohen Dynamikumfang der Adaptionsluminanz verändern und wie wir dieses Verhalten nutzen können, um die Wahrnehmungscharakteristiken bei stereoskopischen Bildschirmen zu verbessern. Auf diese Weise erreichen wir eine bessere Tiefenreproduktion, schwächen visuelle Artefakte ab und verbessern den Betrachterkomfort.

Die Forschungsmethodik ist in der gesamten Dissertation einheitlich, sowohl für den Teil über Bewegung als auch für den Teil über HDR Stereoskopie. Unsere Methoden sind fest in der Wahrnehmungsforschung verankert und erweitern diese oft durch eigene Messungen in Fällen, bei denen spezieller Bedarf aufgrund unserer Anwendungen entsteht. Wir verallgemeinern die Beobachtungen in ein Wahrnehmungsmodell, das wiederum in ein Berechnungsmodell umgewandelt wird, um unsere Eingabedaten zu verarbeiten. Dieses Modell kann entweder direkt als Metrik verwendet, oder - häufiger - in den Rahmen einer Optimierung integriert werden, welche eine Verbesserung der angestrebten Bildqualität wie Tiefenwiedergabe oder Betrachterkomfort zu erreichen versucht. Am Ende wird der Kreis durch eine Validierungsstudie geschlossen, die bestätigt, dass Eigenschaften, die ursprünglich für einfache Stimuli beobachtet wurden, auch gelten, wenn das Modell auf komplexe Bilder angewendet wird.

2 Stereoskopisches 3D und Bewegung

Im ersten Teil der Dissertation konzentrieren wir uns auf Bewegung in stereoskopischen Anwendungen. Diese Bewegung stammt sowohl vom Inhalt selbst, da Filme oder interaktive Anwendungen naturgemäß Bewegung beinhalten, als auch von der Eigenbewegung des Betrachters, wie sie durch HMDs mit Kopf- und Blick-Tracking nachgebildet wird und dadurch das Eintauchen in virtuelle Welten und neue Wege in der Mensch-Maschine-Interaktion erlauben. Über den üblichen Schwerpunkt zeitliche Kohärenz zu erreichen hinausgehend, studieren wir die zeitlichen Grenzen des HVS und wie Bewegung uns dabei unterstützt, die Welt zu verstehen.

2.1 Optimierung von Disparität für Bewegung in der Bildebene

Aufgrund einer Diskretisierung sowohl im Raum als auch in der Zeit unterliegt stereoskopische Bewegung, die auf einem Bildschirm abgebildet wird, einer Reihe von Einschränkungen im Hinblick auf die von Natur aus kontinuierliche Welt [Ke14a]. Wir beschreiben, wie Aufnahmeprotokolle, die sich an den Inhalt anpassen, bei zeitsequentiellen Bildschirmen unechte Bewegungen in der Tiefenwahrnehmung reduzieren können. Eine andere Bewegungsverzerrung stammt von einer Kombination aus Bildschirmdesign und einer speziellen Einschränkung des HVS selbst. Wir untersuchen dieses Verhalten für einen anaplyphen Bildschirm und schlagen eine zeitliche Ausgleichung des entstehenden Pulfrich-Effekts vor.

2.2 Optimierung von Disparität für Bewegung in die Tiefe

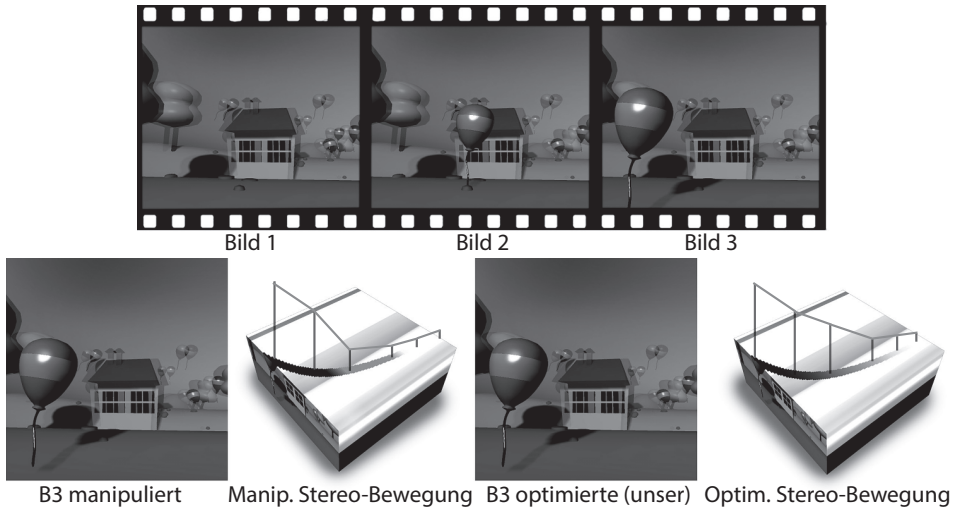


Abb. 2: Eine Bildsequenz mit einem Ballon, der sich in der Tiefe bewegt (*oben*). Die Verzerrung der Tiefenbewegung als Resultat einer typischen Disparitätsmanipulation (*unten links*) und unser optimiertes Ergebnis (*unten rechts*).

Die Wahrnehmung von dynamischem Stereoinhalt beruht darauf, das komplette Disparität-Zeit-Volumen, das ein bewegter Szenenpunkt durchläuft, wiederzugeben [Ke13]. Dieses Volumen kann während der Disparitätsmanipulation, die lediglich Disparitätsveränderungen in jedem Einzelbild berücksichtigt, stark verzerrt werden, selbst wenn die zeitliche Kohärenz dieser Veränderung beibehalten wird (Abb. 2). Wir führen experimentelle Messungen durch um herauszufinden, wie empfindlich ein menschlicher Betrachter auf verschiedene Disparitätsverzerrungen reagiert. Daraufhin schlagen wir eine auf Wahrnehmungsmodellen zeitlicher Disparitätsveränderungen basierende Optimierung vor, die Stereobewegung von Inhalten nach einer beliebigen Manipulation der Disparität erhält. Des Weiteren führen wir ein neues 3D-Warping-Verfahren ein, das Stereobildpaare erzeugt, die dieser optimierten

Disparität entsprechen. Nutzerstudien zeigen, dass unser Verfahren sowohl den Betrachterkomfort als auch die Leistungsfähigkeit in Aufgaben zur Tiefenbestimmung verbessert.

2.3 Blickgesteuerte Disparitätsmanipulationen

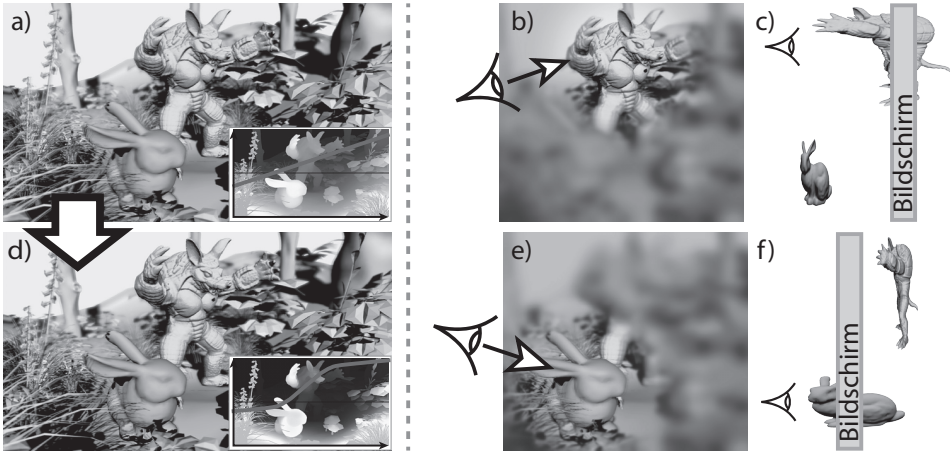


Abb. 3: Unser Ansatz (d) geht über übliche Disparitätsanpassungen (a) hinaus und passt sich der Bildregion an, die der Betrachter fixiert, wie beispielsweise das Gürteltier (b) oder das Kaninchen (e). In dieser Bildregion wird die Disparität nahtlos angepasst, um den Tiefeneindruck zu verstärken und Unbehagen zu reduzieren, das durch den Akkomodation-Vergenz-Konflikt entsteht (c,f).

In vielen Szenarien ist der Tiefenumfang, der durch das Wahrnehmungselement der Disparität mittels Stereoskopie wiedergegeben werden kann, stark eingeschränkt und in der Regel durch technische Bedingungen festgelegt [Sh11]. Wir zeigen, dass dieses Problem erheblich verringert werden kann, wenn die Fixationsbereiche des Auges grob abgeschätzt werden können [Ke16b]. Wir schlagen ein Verfahren zur stereoskopischen Tiefenanpassung vor, das Augen-Tracking oder andere Informationen zur Vorhersage von Blickrichtungen verwendet (Abb. 3). Wir verwenden einen handelsüblichen Augen-Tracker, um die Blickrichtung abzuschätzen, allerdings könnte eine RGB-Kamera in Kombination mit einem Computer-Vision-Algorithmus zur Blickrichtungserkennung in naher Zukunft eine Alternative sein [Kh16]. Anders als frühere Arbeiten wenden wir sukzessive, nicht wahrnehmbare Tiefenanpassungen während der Augenfixation an und nutzen aus, dass Wahrnehmungsstudien dem menschlichen Sehsinn eine relativ geringe Empfindlichkeit in Bezug auf zeitlichen Disparitätsmodulationen attestieren [Ke15a, KGB14]. Wir messen die Geschwindigkeitsbegrenzungen von Disparitätsveränderungen in verschiedenen Szenarios bei denen Tiefe angepasst wird, und formulieren ein neues Modell, das solch eine nahtlose Verarbeitung von stereoskopischen Inhalten steuert. Auf der Grundlage dieses Modells schlagen wir eine latenzunempfindliche Echtzeitsteuerung vor, die lokale Manipulationen an stereoskopischen Inhalten vornimmt, um das Optimum zwischen Tiefenwiedergabe und Betrachtungskomfort zu finden. Außerdem zeigen wir den Nutzen unseres Modells in Offline-Anwendungen, zum Beispiel als Vorverarbeitung in der stereoskopischen Filmproduktion. Eine Validierungsstudie belegt erhebliche Verbesserungen der Tie-

fenwahrnehmung, ohne dass bei der Anwendung unserer Methoden die visuelle Qualität leidet.

2.4 Bewegungsparallaxe als ein Tiefenwahrnehmungselement

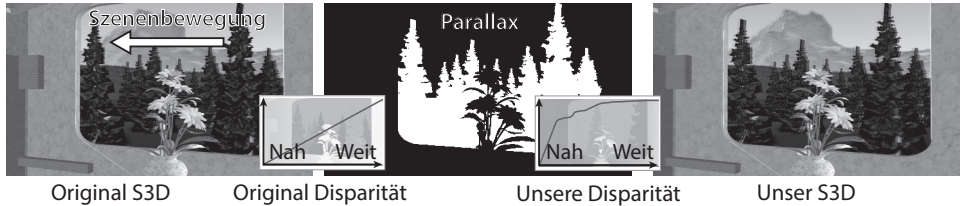


Abb. 4: Die Bewegung des Zuges erzeugt einen Parallaxeneffekt im Bereich der Landschaft (*links*). Unsere Methode erkennt Bildregionen, in denen Bewegungsparallaxe als ein zusätzliches Tiefenwahrnehmungselement fungiert (*mitte, weiß*) und verwendet unser Modell, um das Tiefenbudget von diesen Bildregionen (*der Landschaft*) in solche Regionen umzuverteilen, in denen die Disparität stärker gebraucht wird (*das Innere des Zuges, rechts*).

Aktuelle Bildschirme, insbesondere automultiskopische, können lediglich einen beschränkten Disparitätsumfang wiedergeben. Wir untersuchen Bewegungsparallaxe, ein verhältnismäßig starkes Tiefenwahrnehmungselement [NS09], das jedoch völlig zweidimensional und deshalb in seiner Wiedergabe nicht beschränkt ist [Ke16c]. In vielen praktischen Szenarien kann Tiefe durch Bewegungsparallaxe eine aggressive Kompression der Disparität kompensieren. Wir führen psychovisuelle Experimente durch, welche den Einfluss von Bewegungsparallaxe auf die Tiefenwahrnehmung messen, und setzen ihn mit der Tiefe, die von binokularer Disparität herrührt, in Beziehung. Unser gesamtheitliches Disparität-Parallaxe-Berechnungsmodell prognostiziert die empfundene Tiefe, die von beiden Wahrnehmungselementen stammt. Daraufhin stellen wir neue Methoden zur Disparitätsmanipulation vor, die zuerst die aus der Bewegungsparallaxe gewonnene Tiefe messen und dann entsprechend die binokulare Disparität anpassen. Eine Nutzerstudie zeigt, dass Zuordnungen des Tiefenbudgets in Abhängigkeit von der Stärke der Bewegungsparallaxe die Tiefenwahrnehmung insgesamt verbessert (Abb. 4).

3 Teil II: Stereoskopisches 3D und HDR

Im zweiten Teil der Dissertation untersuchen wir zum ersten Mal die Wiedergabe von stereoskopischen Inhalten auf Bildschirmen mit hohem Dynamikumfang (HDR). Wir erforschen den Effekt von sowohl sehr hellen als auch sehr dunklen Luminanzniveaus auf die Disparitätswahrnehmung. Mit Hilfe von genauen Simulationen betrachten wir den gesamten Luminanzumfang, der vom menschlichen Sehsinn wahrgenommen werden kann und weiterhin die Möglichkeiten handelsüblicher Bildschirme überschreitet.

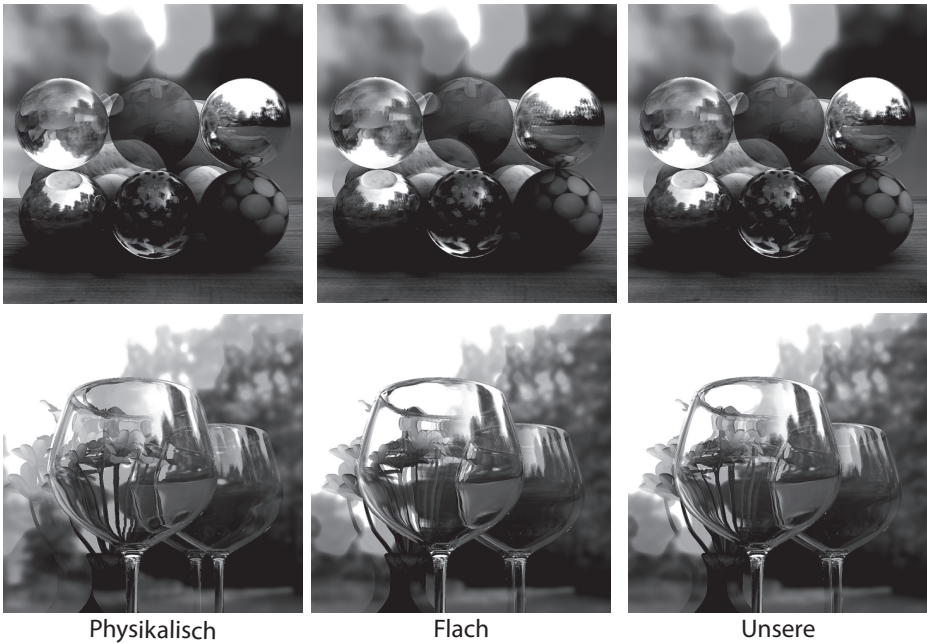


Abb. 5:  Unsere Methode (*Rechts*) findet einen Kompromiss zwischen dem physikalisch korrekten stereoskopischen Rendern von Reflexionen und Refraktionen (*Links*) und deren flacher Platzierung auf Objektoberflächen (*Mitte*). Auf diese Weise wird gleichzeitig eine ansprechende Tiefenerscheinung und ein angenehmes Betrachten beibehalten.

3.1 Wahrnehmung von Disparität bei photopischem Sehen

Helle Bilder, die bei Tageslicht entstanden sind, werden oft mit glänzend reflektierenden oder lichtbrechenden Oberflächen in Verbindung gebracht. Ungeachtet des Reizes, den diese blickwinkelabhängigen Effekte ausüben, verursachen sie bei ihrer Darstellung in stereoskopischem 3D doch eine Herausforderung. Lichttransport durch optische Schnittstellen kann leicht unangenehm große Disparitäten oder Verzerrungen der entstehenden Bilder zur Folge haben. Dies verhindert die Fusion der Bilder und verursacht unangenehme Rivalität (Abb. 5, oben). Obwohl solche Effekte auch in der Realität vorkommen [Mu13], behaupten wir, dass sie auf aktuellen Bildschirmen unerwünscht sind, da das Fehlen korrekter Akkommodation und die fehlende Möglichkeit, den unangenehmen Blickwinkel durch eine Kopfbewegung zu verändern, den Sinneseindruck erheblich verändern. Wir schlagen ein Optimierungsschema vor, das die Kameraparameter für jeden Pixel so modifiziert, dass visuell angenehme und realistische Disparitäten beibehalten und störende Rivalitäten verhindert werden (Abb. 5, unten). Wir validieren unseren Ansatz in einer Nutzerstudie, in der unsere Methode einen größeren Betrachtungskomfort und gleichzeitig einen höheren Realitätsgrad im Vergleich zu konkurrierenden Arbeiten erreicht [Da14].

3.2 Wahrnehmung von Disparität bei skotopischem Sehen

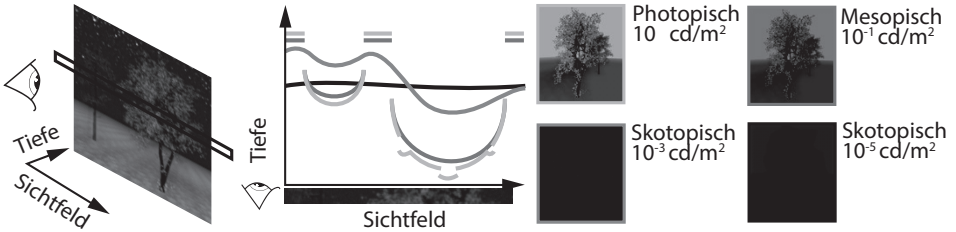


Abb. 6: Die Wahrnehmung von Tiefe wird bei sehr dunklen Luminanzniveaus vermindert, da kleine Elemente nicht mehr zu unterscheiden sind. Unser Modell berechnet dieses Verhalten und erlaubt es uns diesen Effekt auf normalen photopischen Bildschirmen zu simulieren.

Das Erscheinungsbild einer skotopischen Nachtszene bei wenig Licht kann auf einem photopischen Bildschirm durch Farbentsättigung, verringerte Sehschärfe und die Purkinje-Blauverschiebung simuliert werden ("Day-for-Night") [Fe96, TSF02]. Wir behaupten, dass eine wirklichkeitsgetreue Stereoabbildung von Nachtszenen auf photopischen Stereobildschirmen nicht nur eine Manipulation der Farben, sondern auch eine der binokularen Disparität erfordert (Abb. 6). Zu diesem Zweck führen wir ein psychophysisches Experiment durch, um ein Disparitätsmodell für skotopische Luminanzniveaus zu konstruieren [Ke14b]. Mit Hilfe dieses Modells können wir die binokulare Disparität von skotopischen Stereoinhalten, die auf einem photopischen Bildschirm dargestellt werden, an die Disparitäten anpassen, die wahrgenommen würden, wenn die Szene tatsächlich skotopisch wäre. Das Modell erlaubt eine Echtzeitverarbeitung für interaktive Anwendungen, wie zum Beispiel Simulationen oder Computerspiele.

3.3 Wahrnehmung von Luminanz an der Minimalreizschwelle



Abb. 7: Das Erscheinungsbild von Rauschen im menschlichen Wahrnehmungssystem bei Adaptationsniveaus nahe der Minimalreizschwelle ist dynamisch und abhängig von der tatsächlichen Lichtstärke. Anders als frühere Arbeiten erfasst unser Modell diese Eigenschaften, um ein realistischeres Erscheinungsbild zu erzeugen.

Wenn die menschliche Lichtmengenwahrnehmung nah an der Minimalreizschwelle arbeitet, ist stereoskopisches Sehen nicht mehr möglich und das Erscheinungsbild im Vergleich zum üblichen photopischen oder skotopischen Sehen verändert sich wesentlich

[Ke15b]. Die meisten Beobachter berichten von zeitlich variierendem Rauschen aufgrund von Quantenrauschen (bedingt durch die geringe Anzahl der Photonen) und spontanen photochemischen Reaktionen (Abb. 7) [HSP42]. Bisher wurde statisches normalverteiltes Rauschen, das sich nicht an die absolute Lichtmenge anpasst, benutzt, um ein skotopisches Erscheinungsbild auf photopischen Bildschirmen für Filme und interaktive Anwendungen zu simulieren. Unser wahrnehmungskalibriertes Berechnungsmodell bildet die experimentell hergeleitete Verteilung und Dynamik von "skotopischem Rauschen" bei einem gegebenen Luminanzniveau nach und unterstützt animierte Bilder. Die Echtzeitsimulation wird beim Vergleich zu einfacheren Alternativen in einem Wahrnehmungsexperiment bevorzugt.

4 Conclusion

Der kommerzielle Erfolg von stereoskopischen Filmen der neuesten Generation im Vergleich zu früheren Bemühungen ab den 1950er Jahren kann sowohl durch technische Weiterentwicklungen als auch durch Fortschritte in unserem Verständnis der menschlichen stereoskopischen Wahrnehmung erklärt werden. Aufgrund von umfassender vorausgegangener Forschung sind wir heutzutage deutlich besser über die Einschränkungen des menschlichen Sehsystems in Bezug auf die Wahrnehmung von Disparität und anderen Phänomenen informiert. Daraus folgen praktische Richtlinien, die befolgt werden sollten, um bequeme und angenehme 3D-Inhalte zu produzieren. In dieser Dissertation zielen wir darauf ab, dieses Verständnis weiter auszudehnen, indem wir die stereoskopische Tiefe nicht isoliert betrachten, sondern auch Wechselwirkungen unserer Tiefenwahrnehmung mit anderen Phänomenen multimedialer Inhalte untersuchen. Konkret haben wir den Einfluss von Bewegung unterschiedlicher Art und einen großen absoluten Luminanzumfang erforscht. Diese beiden Aspekte sind wichtig für aufkommende Bildschirmtechnologien wie beispielsweise Head-Mounted Displays für virtuelle Realität, die sich auf Interaktion und freie Bewegung stützen, aber auch auf HDR Bildschirme, die realitätsgetreue Luminanzeindrücke erzeugen.

Wir haben die Leistungsfähigkeit des menschlichen Sehsystems unter verschiedenen Bedingungen gemessen, um Lücken in früheren Untersuchungen zu schließen oder einen größeren Anwendungsumfang zu ermöglichen. Auf diese Weise konnten wir Modelle der menschlichen Wahrnehmung und zweckmäßige Algorithmen konstruieren, die zentrale Aspekte des stereoskopischen Sehens, wie zum Beispiel den Realitätsgrad, den Betrachterkomfort oder die Tiefenwahrnehmung, verbessern. Die Ergebnisse wurden in Nutzerstudien validiert, durch die eine Verbindung zwischen den auf künstlichen Stimuli basierenden Modellen und komplexen realitätsnahen Beispielen hergestellt wird.

Unsere Ergebnisse haben nicht nur im Rahmen aktueller stereoskopischer Spiele und Filme Gültigkeit, sondern können auch in Szenarien mit virtueller und erweiterter Realität angewendet werden, bei denen Genauigkeit in der Tiefenreproduktion mittels stereoskopischer Verfahren ein wichtiger Bestandteil für Immersion und die Glaubhaftigkeit der Erlebnisse ist.

Obwohl einige der von uns behandelten Einschränkungen möglicherweise durch zukünftige Hardware aufgelöst werden können, glauben wir dennoch, dass viele Ideen dieser Arbeit weiterhin Gültigkeit haben werden. Dies kann anhand des Beispiels von Disparitätsanpassungen für sehr dunkle Luminanzbedingungen veranschaulicht werden. In diesem Fall wäre die Lösung, einen sehr dunklen Bildschirm zu verwenden, zwar möglich, aber nicht sehr praktikabel, denn es würde eine kontrollierte Umgebungsbeleuchtung und lange Adaptationszeiten erfordern und dieses Verfahren damit für den Gelegenheitsnutzer unattraktiv machen. Daher werden Verfahren, welche die Sinneserfahrung imitieren anstatt die Realität physikalisch korrekt zu reproduzieren, auch in Zukunft reizvoll bleiben.

Literaturverzeichnis

- [Da14] Dabała, Łukasz; Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Didyk, Piotr; Templin, Krzysztof; Myszkowski, Karol; Rokita, Przemysław; Seidel, Hans-Peter: Manipulating refractive and reflective binocular disparity. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics 2014)*, 33(2):53–62, 2014.
- [Fe96] Ferwerda, James A.; Pattanaik, Sumanta; Shirley, Peter; Greenberg, Donald: A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis. In: *Proc. SIGGRAPH*. S. 249–58, 1996.
- [HSP42] Hecht, Selig; Shlaer, Simon; Pirenne, Maurice Henri: Energy, quanta, and vision. *J Gen Phys*, 25(6):819–840, 1942.
- [Ke13] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Optimizing Disparity for Motion in Depth. *Computer Graphics Forum (Proc. EGSR 2013)*, 32(4):143–152, 2013.
- [Ke14a] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Improving Perception of Binocular Stereo Motion on 3D Display Devices. *Proc. SPIE*, 9011:901116–901116–11, 2014.
- [Ke14b] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Vangorp, Peter; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Stereo Day-for-Night: Retargeting Disparity for Scotopic Vision. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 11(3), 2014.
- [Ke15a] Kellnhofer, Petr; Leimkühler, Thomas; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: What Makes 2D-to-3D Stereo Conversion Perceptually Plausible? In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*. SAP '15, ACM, New York, NY, USA, S. 59–66, 2015.
- [Ke15b] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Eisemann, Elmar; Seidel, Hans-Peter: Modeling Luminance Perception at Absolute Threshold. *Computer Graphics Forum (Proc. EGSR 2015)*, 34(4):155–164, 2015.
- [Ke15c] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: A Transformation-Aware Perceptual Image Metric. *Proc. SPIE*, 9394:939408–939408–14, 2015.
- [Ke16a] Kellnhofer, Petr: Perceptual modeling for stereoscopic 3D. *Dissertation*, Saarland University, 2016.
- [Ke16b] Kellnhofer, Petr; Didyk, Piotr; Myszkowski, Karol; Hefeeda, Mohamed M.; Seidel, Hans-Peter; Matusik, Wojciech: GazeStereo3D: Seamless Disparity Manipulations. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 35(4), 2016.

- [Ke16c] Kellnhofer, Petr; Didyk, Piotr; Ritschel, Tobias; Masia, Belen; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Motion Parallax in Stereo 3D: Model and Applications. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2016)*, 35(6), 2016.
- [KGB14] Kane, David; Guan, Phillip; Banks, Martin S: The limits of human stereopsis in space and time. *The Journal of Neuroscience*, 34(4):1397–1408, 2014.
- [Kh16] Khosla, Aditya; Krafska, Kyle; Kellnhofer, Petr; Kannan, Harini; Bhandarkar, Suchi; Matusik, Wojciech; Torralba, Antonio: Eye Tracking for Everyone. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, USA, June 2016.
- [La09] Lambooij, Marc; IJsselstein, Wijnand; Fortuin, Marten; Heynderickx, Ingrid: Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *J. Imaging Sci. Technol.*, 53(3):1, 2009.
- [Le16] Leimkühler, Thomas; Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Perceptual real-time 2D-to-3D conversion using cue fusion. In: *Proceedings of the 2016 Graphics Interface Conference*. GI '16. Canadian Information Processing Society, 2016.
- [Mu13] Murry, Alexander A.; Welchman, Andrew E.; Blake, Andrew; Fleming, Roland W.: Spectular reflections and the estimation of shape from binocular disparity. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 110(6):2413–2418, 2013.
- [NS09] Nawrot, Mark; Stroyan, Keith: The motion/pursuit law for visual depth perception from motion parallax. *Vision Research*, 49(15):1969–1978, 2009.
- [Sh11] Shibata, Takashi; Kim, Joohwan; Hoffman, David M.; Banks, Martin S.: The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *J. Vision*, 11(8):11, 2011.
- [TSF02] Thompson, William B.; Shirley, Peter; Ferwerda, James A.: A spatial post-processing algorithm for images of night scenes. *J. Graph. Tools*, 7(1):1–12, 2002.



Petr Kellnhofer wurde am 26. Januar 1988 in Tschechien geboren. Von 2007 bis 2012 studierte er Informatik mit Schwerpunkt Computergrafik an der Westböhmisches Universität in Pilsen. Im Jahr 2012 erhielt er seinen Abschluss als Master (Ing.) mit der Abschlussarbeit “Non-rigid Transformations for Musculoskeletal Model”, die von Doc. Josef Kohout betreut wurde. Von 2012 bis 2016 war er Doktorand im Bereich Computergrafik an der Universität des Saarlandes und dem Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken unter der Leitung von Prof. Karol Myszkowski und Prof. Hans-Peter Seidel. Sein Forschungsinteresse

sind die menschliche Wahrnehmung, stereoskopisches 3D und Computergrafikanwendungen. Während seiner Promotion publizierte er in internationalen Konferenzen und Zeitschriften und erhielt den “Best Student Paper Award” für die Arbeit “A Transformation-Aware Perceptual Image Metric” [Ke15c] und den “Best Student Paper Award” für die Arbeit “Perceptual real-time 2D-to-3D conversion using cue fusion” [Le16]. Während eines Forschungsaufenthaltes am MIT CSAIL untersuchte er neuartige Displays unter der Leitung von Prof. Wojciech Matusik. Er verteidigte seine Dissertation “Perceptual modeling for stereoscopic 3D” im November 2016. Seit 2017 ist er Postdoktorand in der Gruppe von Prof. Matusik am MIT CSAIL.