

Georg August Universität Göttingen
Fakultät für Informatik

Bericht Computergrafik

Zu dem Paper „Predicting Sky Dome Appearance on Earth-like Extrasolar Worlds“

Autor: Sven Voigt
MatNr. 21348099

Dozent Prof. Dr. Winfried Kurth

Version vom: 4. Mai 2017

Modulbezeichnung: Seminar Grafische Datenverarbeitung
ModulNr.: Modul M.Inf.1261

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Motivation	4
2	Zugehörige Forschung	5
2.1	Aussehen von Exoplaneten	5
2.2	Emissionsspektren	6
2.2.1	Hertzsprung-Russell Diagramm	7
2.3	Analytische Modelle	8
3	Anpassung des Hošek Modells für exoplanetare Szenen	9
3.1	Sonnenstrahlung	9
3.2	Helligkeitsmuster im Himmelsdom	11
4	Ergebnisse	12
4.1	Einzelne Sterne	12
4.2	Binäre Sterne	15
4.2.1	Tatooine	17
4.2.2	Solaris	19
5	Abschluss	21

Abbildungsverzeichnis

2.1	Der Planet Tatooine aus dem Film „Krieg der Sterne“ (1977).	5
2.2	Eine andere Szene auf Tatooine.	6
2.3	Das Hertzsprung-Russell Diagramm	7
3.1	Unterschiedliche Sonnengrößen am Horizont	11
4.1	Sonnenauf- und Untergänge auf einem Exoplaneten, bestrahlt von Sonnen mit 3.000, 4.000, 5.000, 6.500, 8.000 und 10.000 Kelvin ohne Weißabgleich und ohne Beachtung der UV-Strahlung	12
4.2	Höherer Sonnenstand (48°), Temperaturen wie in Abbildung 4.1, ohne Weißabgleich und ohne Beachtung der UV-Strahlung	13
4.3	Höherer Sonnenstand (48°), Temperaturen wie in Abbildung 4.1, ohne Weißabgleich aber mit Beachtung der UV-Strahlung	14
4.4	Höherer Sonnenstand (48°), Temperaturen wie in Abbildung 4.1, mit Weißabgleich und mit Beachtung der UV-Strahlung	14
4.5	Zwei Beispiele von Sonnen mit jeweils 4.000 und 5.600 Kelvin.	16
4.6	Zwei Sonnen mit 4.000 und 5.600 Kelvin und gleicher Helligkeit	17
4.7	Zwei Sonnen mit 4.000 und 5.600 Kelvin und gleicher Größe	18
4.8	Zwei Sonnen mit 9.800 und 2.600 Kelvin und gleicher Helligkeit	19

1 Einleitung

Das Paper „Predicting Sky Dome Appearance on Earth-like Extrasolar Worlds“ von Lukáš Hošek und Alexander Wilkie ist eine Fallstudie, die das Aussehen von erdähnlichen Planeten mit unterschiedlichen Sonnen untersucht. Die Motivation dieser Fallstudie ist es, einen wissenschaftlich begründeten, ersten Eindruck davon zu schaffen, wie Objekte und Himmel auf extrasolaren Welten aussehen könnten. Die Planeten, die in dieser Arbeit betrachtet werden, haben alle die Eigenschaft, dass Menschen ohne Raumanzüge auf ihnen überleben könnten. Es wird also davon ausgegangen, dass eine erdähnliche Atmosphäre vorhanden ist. Dies macht die Studie sowohl für Forschung als auch für „Science Fiction“ interessant.

1.1 Motivation

Exoplanare Welten sind seit jeher ein spannendes Thema für die Menschheit. Es gibt Anzeichen dafür, dass sich bereits in der Antike Plinius der Ältere mit „Wesen aus fernen Ländern“ beschäftigt hat [1]. Seit der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde das Leben auf extrasolaren Welten jedoch immer interessanter, da die Raumfahrt schnell voran schritt. Somit wurde die „Science Fiction“ der Allgemeinheit bekannter und der Bezug in ihr auf Raumfahrt und außerirdische Wesen geschaffen. Während es viele Vermutungen gibt, wie Exoplaneten wohl aussehen, hat die Studie von Hošek et al. eine physikalische Grundlage. Es ist erwähnenswert, dass nur auf die Lichtbedingungen unter anderen Sonnen eingegangen wird. Jedoch ist es durch Computersimulationen möglich, plausible und realistische Szenen zu rendern, die sogar für die Exobiologie sinnvoll sein können.

2 Zugehörige Forschung

Die zugehörige Forschung, die für die Studie von Hošek et al. wichtig ist, lässt sich auf drei Themenbereiche aufteilen:

- Aussehen von Exoplaneten
- Emissionsspektren von Sternen
- Analytische Modelle für das Aussehen der Himmelskuppel

2.1 Aussehen von Exoplaneten

Es wird erwähnt, dass aufgrund der geringen Anzahl von fundierten Beweisen für das Aussehen von Exoplaneten, nur wenig Arbeit auf dem Gebiet des Rendern von extrasolaren Planeten mit Einfluss der unterschiedlichen Sonnen geleistet wurde.

Die einzigen Beispiele für exoplanetare Welten, die genannt werden, sind „*Xenology – An Introduction to the Scientific Study of Extraterrestrial Life, Intelligence, and Civilization*“ und „*Krieg der Sterne*“. Jedoch schreiben die Autoren auch, dass diese Quellen eher Vermutungen sind als wissenschaftliche Tatsachen. So kann man auf dem fiktivem Planeten Tatooine zwar zwei Sonnen sehen, aber es gibt keine zwei Schatten. In 4.2 werde ich noch genauer darauf eingehen, wie die Schatten von Objekten mit zwei Sonnen aussehen müssten.



Abbildung 2.1: Der Planet Tatooine aus dem Film „Krieg der Sterne“ (1977).



Abbildung 2.2: Eine andere Szene auf Tatooine.
Auffällig sind die fehlenden Doppelschatten.

2.2 Emissionsspektren

Sämtliche Sterne im beobachtbaren Universum folgen, was Strahlung und Aussehen angeht, den gleichen, grundlegenden Regeln. Als grobe Annäherung kann man das Licht der Sterne mit der sogenannten „Hohlraumstrahlung“ beschreiben. Die Strahlung ist wie folgt abhängig von Wellenlänge λ und Temperatur T :

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.1)$$

In der realen Welt sind Emissionsspektren von Sternen jedoch weitaus komplexer als Emissionsspektren von Hohlraumstrahlung. So kann das Emissionsspektrum von ähnlichen Sternen sich zwar stark unterscheiden (in einem kleinen spektralen Maßstab), jedoch argumentieren Hošek et al., diese Untersuchung sei im betrachteten Fall zu vernachlässigen, da es für einen menschlichen Beobachter nahezu unmöglich sei, Änderungen in den Spektren zu bemerken.

2.2.1 Hertzsprung-Russell Diagramm

Um die Strahlung und Farbe von Sonnen zu veranschaulichen, ist das Hertzsprung-Russell Diagramm eine gute Hilfe. In ihm kann man sowohl die Helligkeit, als auch die Größe und Farbe der zugehörigen Sonne ablesen. Zur besseren Orientierung ist die Sonne der Erde genau in der Mitte der Y-Achse mit einem Helligkeitswert von eins, da sie als Maßstab genommen wird.

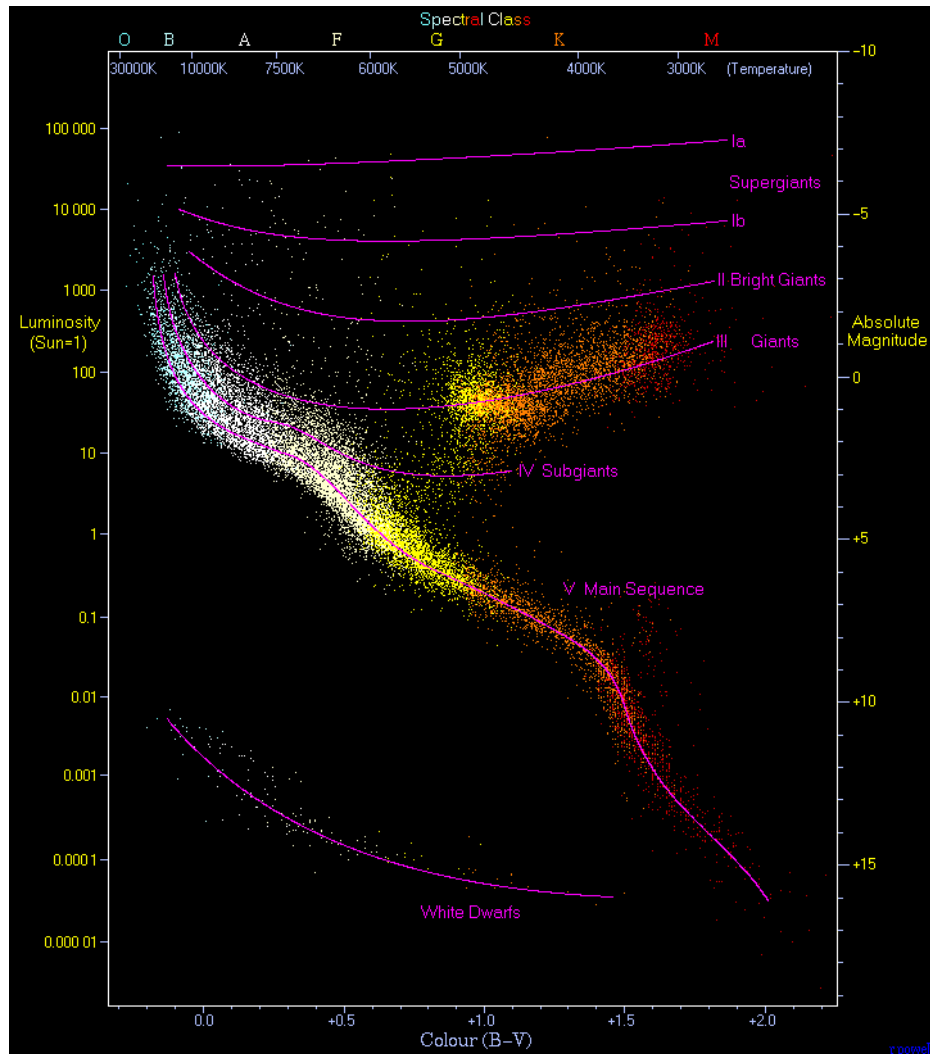


Abbildung 2.3: Das Hertzsprung-Russell Diagramm
Links die Helligkeit der Sonnen, unten der Farbindex, rechts die Größe, oben die „Spektral-Klasse“ .¹

¹Dieses Bild steht unter einer CC BY-SA 2.5 Lizenz zur Verfügung.[5]

2.3 Analytische Modelle

Die Autoren nennen drei Vorgehen, um beim Rendern atmosphärische Effekte und realistische Erscheinungen von Himmelskuppeln einzubeziehen.

- Explizite Lichttransportsimulation in der Atmosphäre
- Hochkontrastbilder von realen Freilandaufnahmen
- Analytische Himmelsdom – Helligkeitsmodelle

Die Lichttransportsimulation kann aufgrund ihrer hohen Rechenzeit nicht verwendet werden. Die Autoren argumentieren, dass dies sehr schade sei, da mit dieser Variante Simulationen erzielt werden könnten, die das Ergebnis der hier beschriebenen Studie überschreiten.

Hochkontrastbilder von realen Freilandaufnahmen haben das Problem, dass sie für exoplanetare Umgebungen nicht zu gebrauchen sind.

Auch die analytischen Modelle sind generell für den Zweck dieser Forschung, der Visualisierung von Exoplaneten, nicht anwendbar, da sie stark auf Vorberechnungen beruhen, die für die Erdatmosphäre ausgelegt sind. Jedoch gibt es hierbei eine Ausnahme, das Hošek Modell berechnet die Helligkeitsmuster und die Strahlung für jedes Wellenband² einzeln. Aufgrund dieser Besonderheit ist das Hošek Modell für erdähnliche Planeten anwendbar. Des Weiteren ist auch die Ultraviolettstrahlung in diesem Modell enthalten, welche sowohl eine wichtige Rolle beim Aussehen von Materialien, als auch in biologischen Mechanismen spielt.

²Ein Bereich von Wellenlängen

3 Anpassung des Hošek Modells für exoplanetare Szenen

Da das Hošek Modell für Berechnungen in der Erdatmosphäre erstellt wurde, müssen sowohl die Helligkeitsmuster im Himmelsdom, als auch die Sonnenstrahlung für die exoplanetaren Szenen angepasst werden.

Die Helligkeitsmuster sowie die Strahlung der Sonne haben, wie bereits erwähnt, gemeinsam, dass sie für einzelne Wellenbänder berechnet werden. Da die Intensität jedes Wellenbands nur von dem jeweiligem Stern abhängt, ist es simpel, die Wellenbänder so zu skalieren, dass sie zu der Strahlung des Sterns passen.

Für eine gegebene Sternentemperatur T , jedes Wellenband i ($i \in [0 \dots 11]$) nach der Definition des Hošek Modells [3]), dem Verhältnis von Hohlraumstrahlung (2.1) für diese Wellenlänge und der ursprünglichen Sonnenstrahlung S_i wird

$$f_i = \frac{I(\lambda_i, T)}{S_i} \quad (3.1)$$

berechnet.

Dieser Faktor f_i wird nun benutzt, um die Intensität aller Wellenbänder i zu skalieren, die sowohl bei den Helligkeitsmustern, als auch bei der Strahlung benutzt werden.

Jedoch müssen noch weitere Faktoren in die Berechnung einbezogen werden. Ein weiterer Faktor ist die Größe der Sonnenscheibe und die damit einhergehende Helligkeit und Strahlung.

3.1 Sonnenstrahlung

Bei der Anpassung der Sonnenstrahlung des Hošek Modells sollte man beachten, dass nur ein relativ kleiner Bereich der Sonnenstrahlung für einen erdähnlichen Planeten überhaupt in Frage kommt. Falls der Planet zu viel Strahlung ausgesetzt ist, ist der Bestand einer Atmosphäre nicht möglich, da der Planet zu heiß wird. Auch das andere Extrem ist zu beachten. Bei zu wenig Strahlung wäre der Planet so kalt, dass die Atmosphäre einfrieren würde und somit auch nicht bestehen bliebe. Daraus folgt, dass, wenn Sterne eine stark unterschiedliche Farbe und Intensität haben, ihre Größen dementsprechend angepasst sein müssen. So muss die Sonnenscheibe für sehr heiße Sonnen sehr klein sein und für kältere Sonnen größer.

Um dies zu berücksichtigen haben die Autoren einen Durchmesser für ein gegebenes Emissionspektrum wie folgt errechnet:

Zuerst wird f_{avg} berechnet (der Durchschnitt der Faktoren aus (3.1) (f_i)). Im nächsten

Schritt wird der Durchmesser der Sonne mit

$$r_E = \frac{r_T}{\sqrt{f_{avg}}} \quad (3.2)$$

skaliert, wobei r_T der Durchmesser unserer Sonne ist. Hierdurch wird der Durchmesser der Sonnenscheibe so angepasst, dass die Energie, die ausgestrahlt wird, ungefähr der Energie unserer Sonne entspricht. Des Weiteren muss jedes Wellenband i der Sonnenstrahlungsfunktion (gegeben durch den zweiten Teil des Hošek Modells [3]) mit dem entsprechendem Faktor f_i skaliert werden.

Eine Anmerkung der Autoren hierzu ist noch, dass Helligkeitsmuster des Hošek Modells nicht mit dem Durchmesser der Sonnenscheibe parametrisiert werden, wodurch das Muster für alle Größen gleich bleibt. Sie schreiben weiter, dass dies nicht korrekt sei, aber in dem Maßstab, in dem gearbeitet wird, auch nicht weiter relevant sei, da man keinen wahrnehmbaren Unterschied sähe.

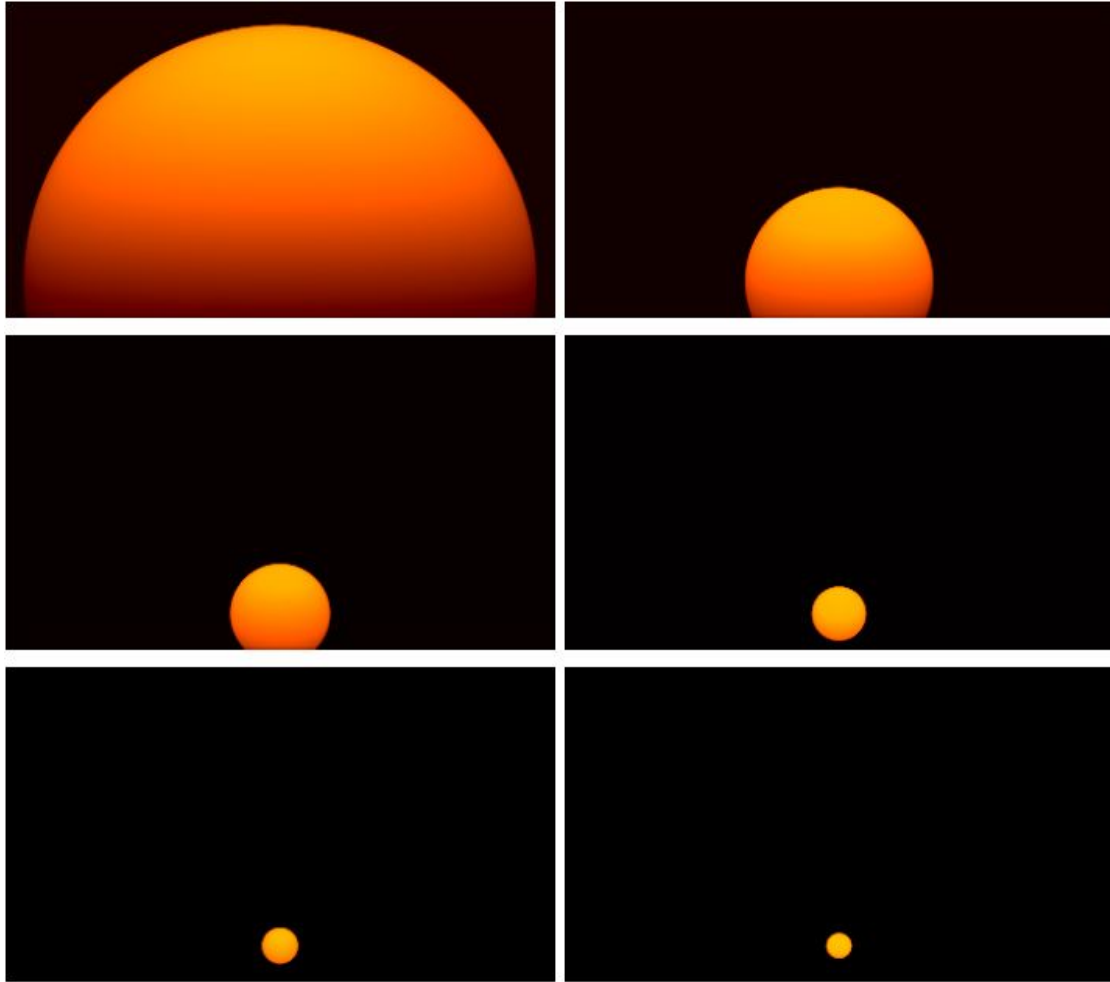


Abbildung 3.1: Unterschiedliche Sonnengrößen am Horizont

3.2 Helligkeitsmuster im Himmelsdom

Da die Sonnenscheibe nun so angepasst wurde, dass ihre Helligkeit der Helligkeit unserer Sonne ungefähr entspricht, müssen auch die Helligkeitswerte des Himmelsdoms mit f_{avg} über alle Wellenbänder skaliert werden. Deshalb wird für jedes Wellenband i das resultierende Helligkeitsmuster \mathbb{F}_E wie folgt berechnet:

$$\mathbb{F}_{Ei}(\theta, \gamma) = \frac{\mathbb{F}(\theta, \gamma)_i \cdot f_i}{f_{avg}}, \quad (3.3)$$

wobei $F(\theta, \gamma)_i$ der Originaloutput des Hošek Modells für das jeweilige Wellenband i ist.

4 Ergebnisse

4.1 Einzelne Sterne

Für realistische Ergebnisse wurde zuerst festgestellt, dass nur Sonnen mit Temperaturen zwischen 3.000 Kelvin und 10.000 Kelvin in Frage kommen, da Sonnen unter 3.000 Kelvin unverhältnismäßig groß sein müssten, um die ausgehende Strahlung auf einem akzeptablen Wert zu halten und das Hošek Modell dafür fragwürdige Ergebnisse liefert. Die obere Grenze wird gewählt, da die Sonne unter Beachtung der Strahlung so klein sein müsste, dass sie zu einer Punkt-Lichtquelle wird. Deshalb ändert sich das Ergebnis nicht für noch heißere Sonnen. Des Weiteren wäre es auch sehr unwahrscheinlich, dass ein erdähnlicher Planet eine so heiße Sonne umkreist.

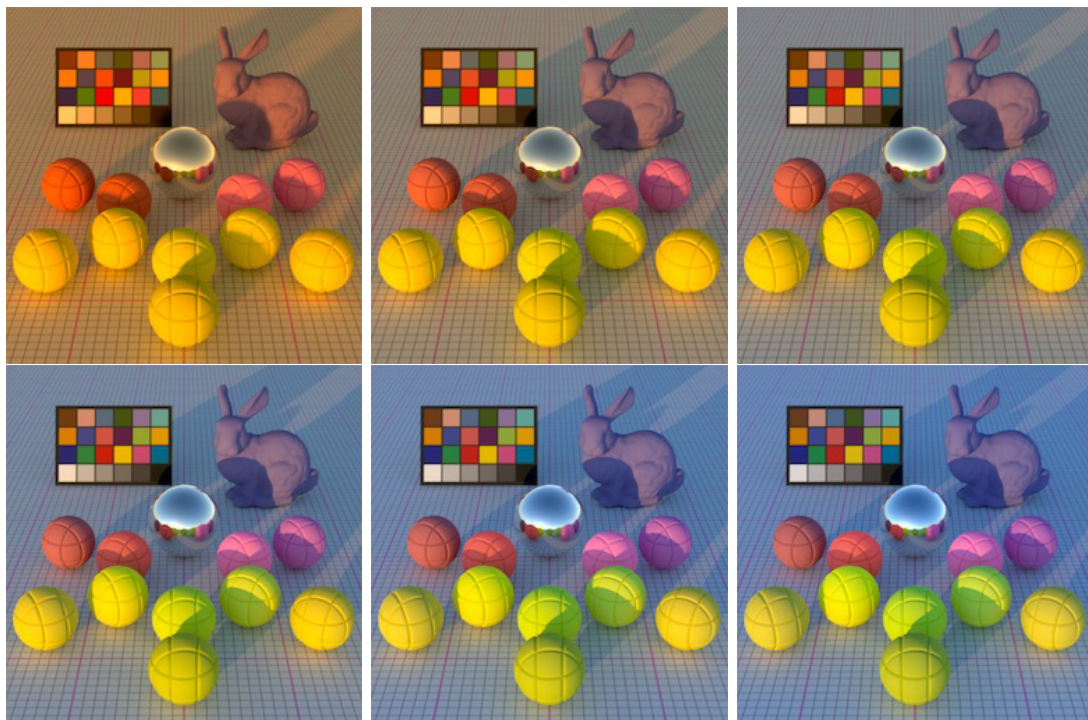


Abbildung 4.1: Sonnenauf- und Untergänge auf einem Exoplaneten, bestrahlt von Sonnen mit 3.000, 4.000, 5.000, 6.500, 8.000 und 10.000 Kelvin ohne Weißabgleich und ohne Beachtung der UV-Strahlung

Bemerkenswert ist, dass trotz der unterschiedlichen Sonnentemperaturen die Sonnenauf- und Untergänge genauso gelb-orange erscheinen wie auf der Erde. Die Autoren merken an, dass dies sogar noch der Fall sei, wenn man die Temperatur der Sonne auf bis zu 40.000 Kelvin erhöht. Jedoch sind wahrnehmbare Unterschiede offensichtlich, hauptsächlich die winzige Sonnenscheibe und der stark blaue Himmel. Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, wirkt die Szene bei 3.000 Kelvin orange und die bei 10.000 Kelvin bläulich.

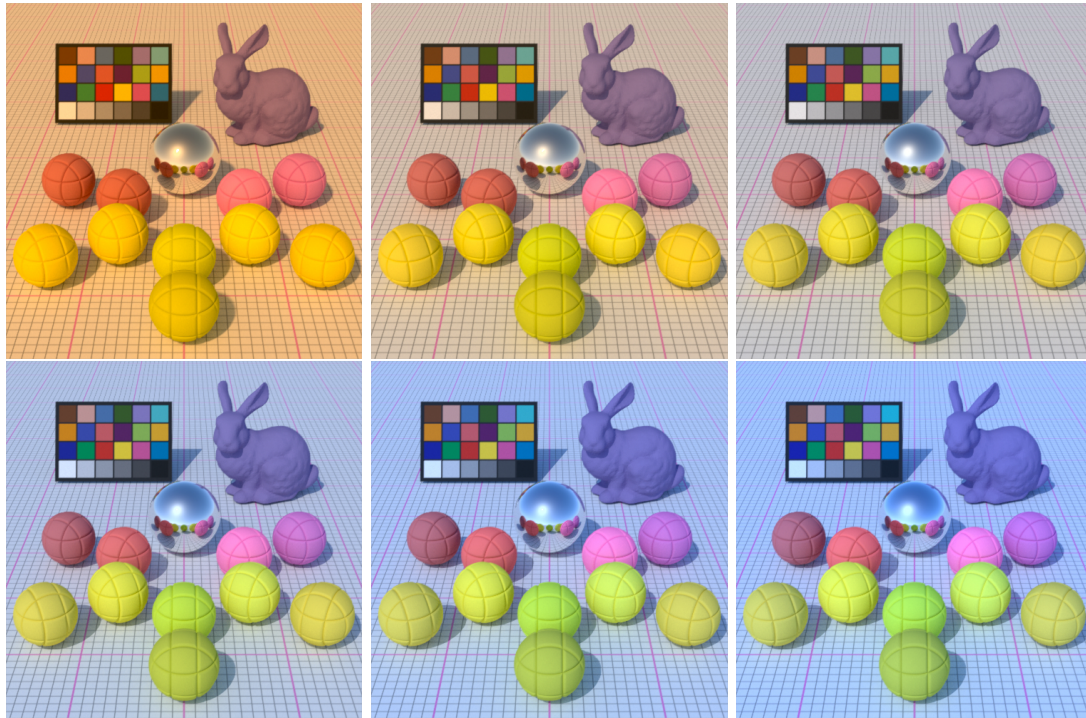


Abbildung 4.2: Höherer Sonnenstand (48°), Temperaturen wie in Abbildung 4.1, ohne Weißabgleich und ohne Beachtung der UV-Strahlung

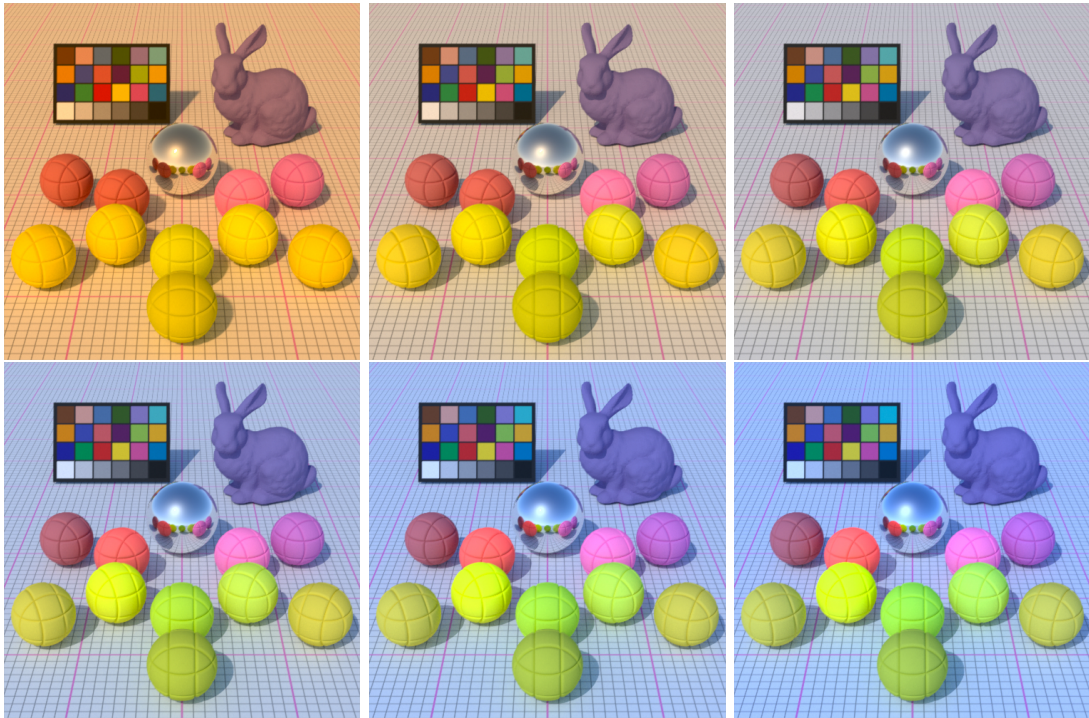


Abbildung 4.3: Höherer Sonnenstand (48°), Temperaturen wie in Abbildung 4.1, ohne Weißabgleich aber mit Beachtung der UV-Strahlung

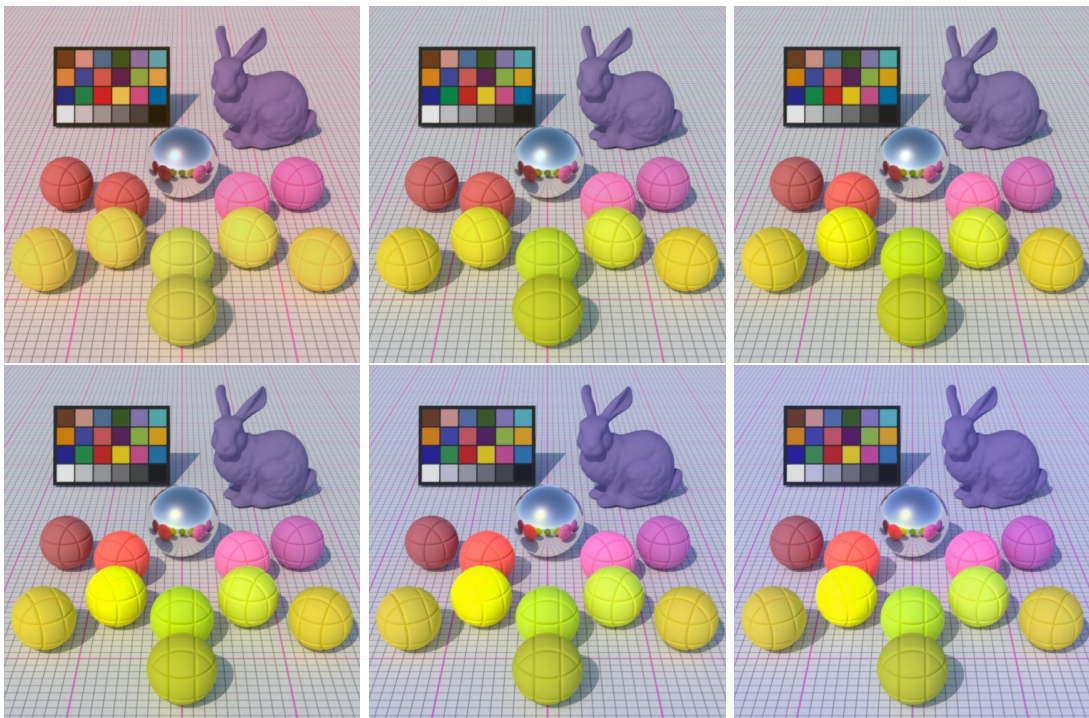


Abbildung 4.4: Höherer Sonnenstand (48°), Temperaturen wie in Abbildung 4.1, mit Weißabgleich und mit Beachtung der UV-Strahlung

Bei diesen Ergebnissen ist zu erwähnen, dass der innere Kreis der bunten Kugeln fluoreszierend ist. So kann man bei heißeren Sonnen sehen, dass die UV-Strahlung diese Bälle zum Leuchten bringt. Am besten zu sehen ist dieser Unterschied im direkten Vergleich von Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3, bei der Sonne, die mit 10.000 Kelvin strahlt. Denn beim Rendern von Abbildung 4.2 wurde die UV-Strahlung nicht mitberechnet.

Erstaunlich ist jedoch, dass bei Beachtung eines Weißabgleichs (Abbildung 4.4) nur noch ein sehr geringer Unterschied zwischen den einzelnen Szenen besteht. So ist kaum ein Unterschied zwischen 5.000 und 10.000 Kelvin zu sehen. Auch der Unterschied der Szene mit der kältesten Sonne (3.000 Kelvin) zu der Szene mit der heißesten Sonne (10.000 Kelvin) ist sehr gering.

Ein weiterer Punkt, der auf diesen Bildern nicht ersichtlich ist, jedoch einem menschlichem Beobachter auffallen würde, ist die Größe der Sonne. Denn eine Sonne mit 10.000 Kelvin wäre sehr klein am Himmel, und es wäre noch viel gefährlicher, in sie hinein zu sehen, als es bei unserer Sonne schon ist.

Als letzte Auffälligkeit sind die Schatten der Objekte je nach Hitze der Sonne stark unterschiedlich. So sind die Ränder der Schatten bei kühlen Sonnen nicht so scharf wie die von heißen Sonnen, sondern wirken etwas verwaschen.

4.2 Binäre Sterne

Das Modell auf zwei Sonnen auszuweiten ist sehr einfach. Wenn es mehr als eine Sonne gibt, können die Lichtquellen einfach addiert werden. In diesem Fall werden zwei Modelle berechnet und kombiniert. Jedoch ist zu beachten, dass die Strahlung der zwei Sonnen zusammen ungefähr der Strahlung unserer Sonne entsprechen sollte, so könnten beide Sonnen zum Beispiel 50% der Strahlung abgeben, oder eine 30% und die andere 70% oder ähnliches. Die genauen Beiträge der einzelnen Sonnen sind dem Modellierendem überlassen.

Die Autoren haben sich auf zwei bestimmte Szenarien aus Literatur und Film beschränkt, Tatooine aus der „Star Wars“-Reihe und „Solaris“ aus dem gleichnamigem Buch von Stanislaw Lem [4].

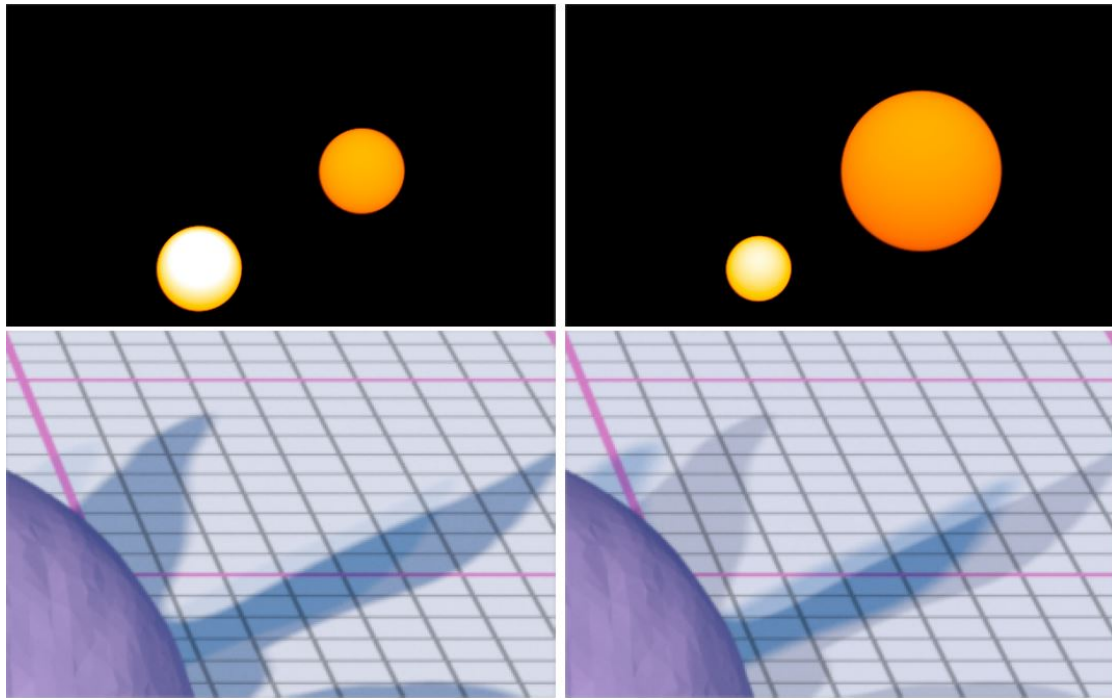


Abbildung 4.5: Zwei Beispiele von Sonnen mit jeweils 4.000 und 5.600 Kelvin. Im linken Bild haben die Sonnen die gleiche Größe, deshalb strahlt die heißere Sonne mehr Energie ab. Im rechten Bild strahlen beide Sonnen gleichviel Energie ab, deshalb muss die kühlere Sonne größer sein.

4.2.1 Tatoonie

Um eine Szene zu rendern, die den Umständen auf Tatoonie entspricht, wurden je eine Sonne mit 4.000 und 5.600 Kelvin gewählt. Diese Sonnen tragen mit 14% bzw. 86% zur Gesamtstrahlung bei. Das Ergebnis dieser Aufnahme sieht wie folgt aus:

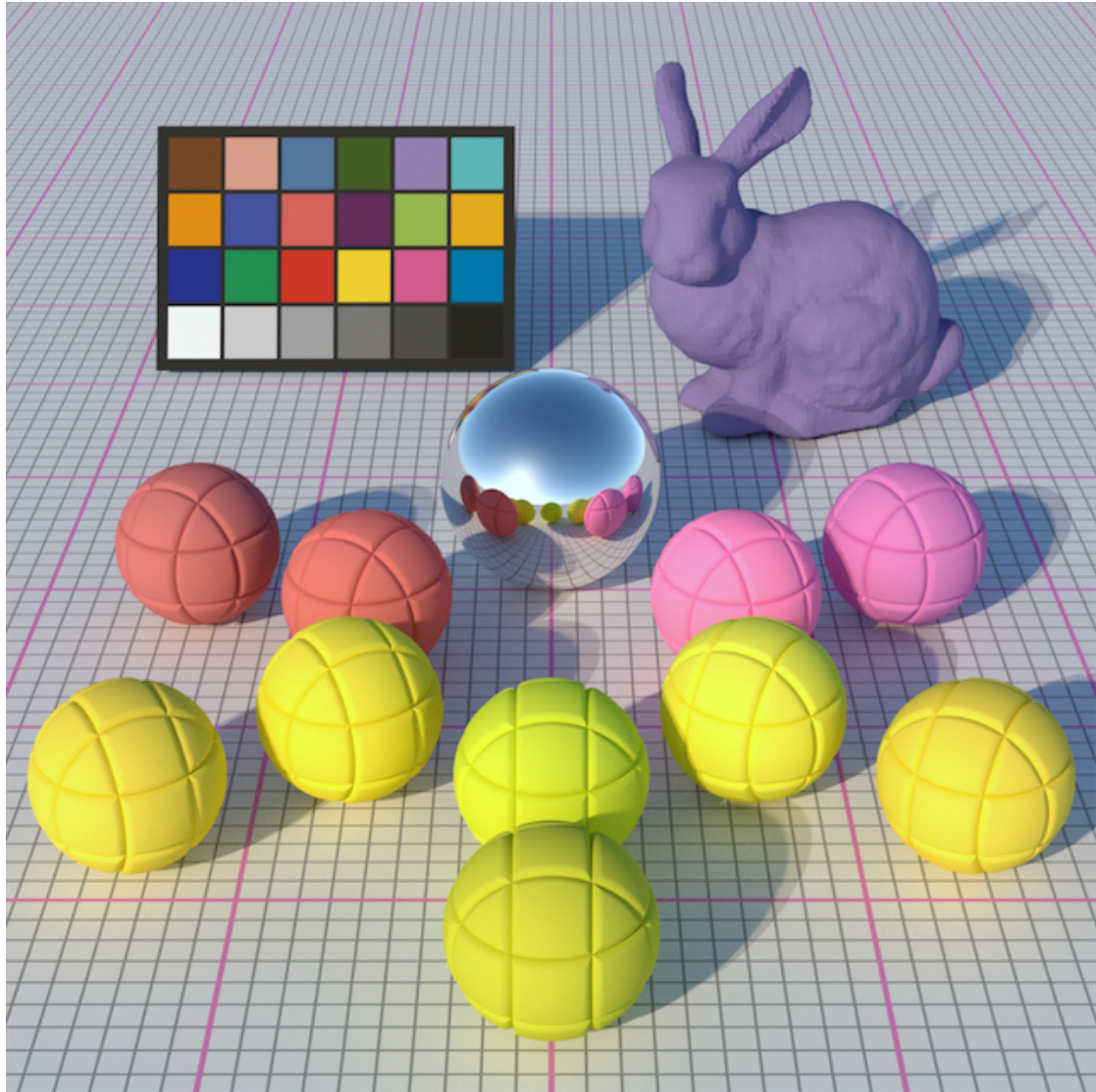


Abbildung 4.6: Zwei Sonnen mit 4.000 und 5.600 Kelvin und gleicher Helligkeit

Als Gegensatz dazu haben die Autoren die Szene auch noch einmal mit gleichgroßen Sonnen gerendert:

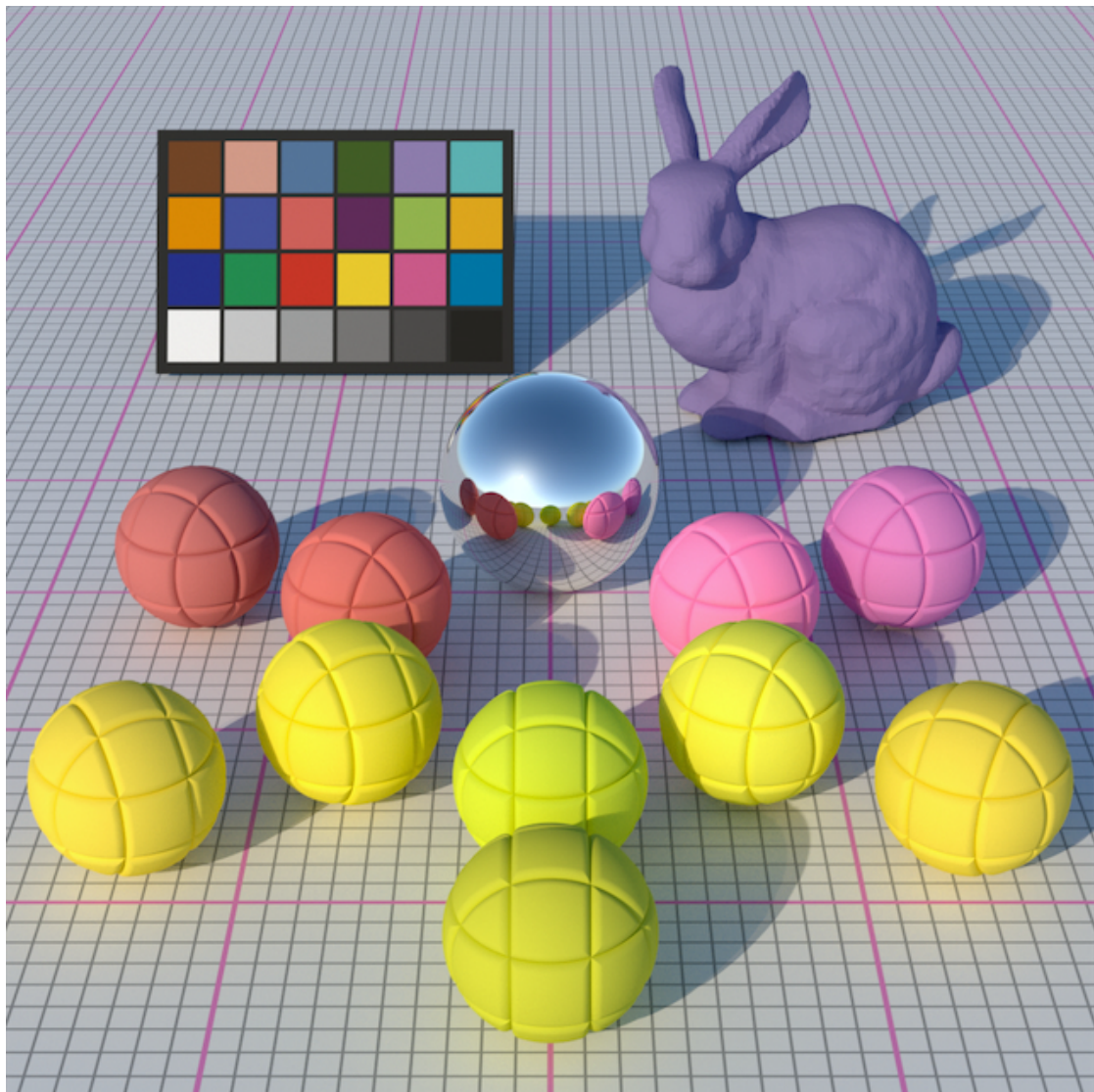


Abbildung 4.7: Zwei Sonnen mit 4.000 und 5.600 Kelvin und gleicher Größe

Bei diesem Experiment mit zwei Sonnen fallen die doppelten Schatten mit unterschiedlichen Farben und unterschiedlicher Stärke sofort auf. Vor allem in Abbildung 4.6 ist dies gut zu sehen, da die Sonnen einen stark unterschiedlichen Beitrag an der insgesamt abgestrahlten Energie geben. Die unterschiedliche Form und Farbe der Schatten, wie auch in Abschnitt 4.1 erklärt, ist ein Resultat dessen, dass die Sonnenscheiben unterschiedlich groß am Himmelsdom erscheinen. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, fehlen im Film die Doppelschatten.

4.2.2 Solaris

Zu der Beispielszene aus Solaris merken die Autoren an, dass in dem Buch nicht erwähnt wird, dass der Planet eine erdähnliche Atmosphäre hat. Sie gehen aber davon aus. Der Planet umkreist, wie auch Tatooine, zwei Sonnen. Diese haben jedoch 9.800 und 2.600 Kelvin Oberflächentemperatur.

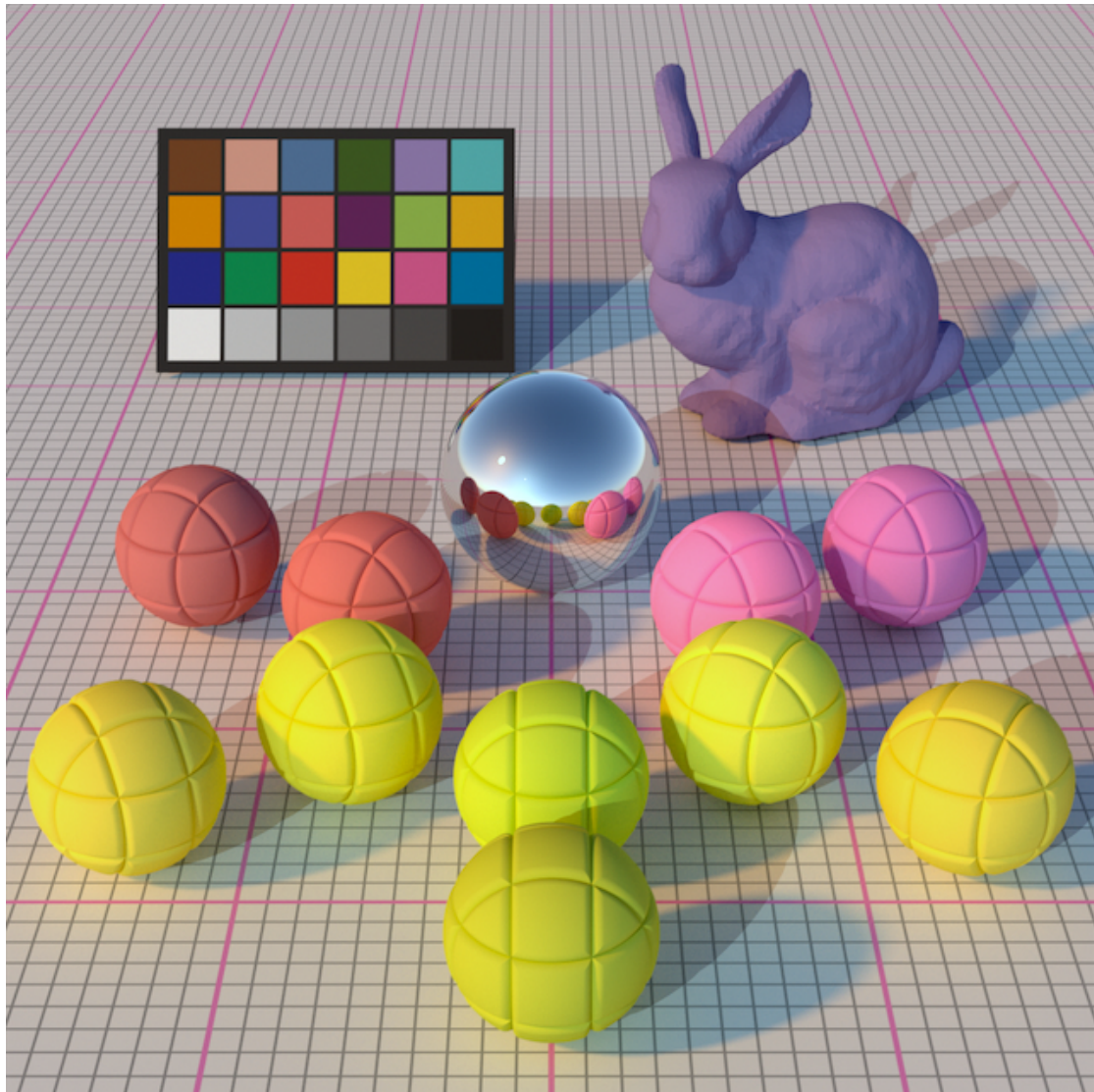


Abbildung 4.8: Zwei Sonnen mit 9.800 und 2.600 Kelvin und gleicher Helligkeit

Wie in dieser Szene zu sehen ist, sind die Doppelschatten noch viel deutlicher als die in Abbildung 4.6, da die Sonnen stark unterschiedliche Beiträge zur Gesamtstrahlung liefern.

Erstaunlich ist jedoch, dass der Rest der Szene nicht stark unterschiedlich zu der gleichen Szene auf der Erde aussieht, nachdem der Weißabgleich mit einberechnet wurde.

5 Abschluss

In der Studie von Hošek et al. wurde ein physikalisch plausibles Modell zur Vorhersage von Himmelsgewölben auf Exoplaneten präsentiert. Es wurde festgestellt, dass trotz starker Unterschiede der Sonnen, die Szenen sehr ähnlich sind zu denen, die auf der Erde existieren. Vor allem mit Berücksichtigung des Weißabgleichs werden die Unterschiede noch geringer. Auch bei zwei Sonnen sieht alles sehr ähnlich aus. Der einzige Unterschied, der dort auftritt, ist die Darstellung der Doppelschatten. Dies kommt höchstwahrscheinlich daher, dass vorausgesetzt wurde, dass auf den jeweiligen Exoplaneten eine erdähnliche Atmosphäre herrscht. Diese trägt wesentlich zum Aussehen von Objekten bei.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Ergebnisse in sofern erstaunlich sind, dass trotz stark unterschiedlicher Sonnen sich die Erscheinung von Objekten, für menschliche Beobachter, kaum verändert. Jedoch kann die Studie von Hošek et al. als Grundlage für weitere Forschung auf diesem Gebiet benutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Jerry Dennis, *The world according to Pliny the Elder*, Smithsonian 26, 8 (Nov.), 1995.
- [2] Lukáš Hošek, Alexander Wilkie, *Predicting Sky Dome Appearance on Earth-like Extrasolar Worlds*, Proceeding SCCG '13 Proceedings of the 29th Spring Conference on Computer Graphics Pages 145-152, 2013.
- [3] ———, *An Analytic Model for Full Spectral Sky-dome Radiance*, ACM Transactions on Graphics, Volume 31, Issue 4, Article No. 95, July 2012.
- [4] Stanislaw Lem, *Solaris*, 1961.
- [5] *Hertzsprung–Russell diagram*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram> (aufgerufen am 17.03.2017).