

Hauptklausur Computergrafik

WS 2015/16

9. März 2016

Kleben Sie hier
**vor Bearbeitung
der Klausur** den
Aufkleber auf.

Beachten Sie:

- Trennen Sie vorsichtig die dreistellige Nummer von Ihrem Aufkleber ab. Sie sollten sie gut aufheben, um später Ihre Note zu erfahren.
- Die Klausur umfasst 20 Seiten (12 Blätter) mit 10 Aufgaben.
- Es sind **keine Hilfsmittel** zugelassen.
- Vor Beginn der Klausur haben Sie 5 Minuten Zeit zum *Lesen* der Aufgabenstellungen. Danach haben Sie **60 Minuten** Bearbeitungszeit.
- Schreiben Sie Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer oben auf jedes bearbeitete Aufgabenblatt.
- Schreiben Sie Ihre Lösungen auf die Aufgabenblätter. Bei Bedarf können Sie weiteres Papier anfordern.
- Wenn Sie bei einer Multiple-Choice-Frage eine falsche Antwort angekreuzt haben und diesen Fehler korrigieren möchten, füllen Sie das betreffende Kästchen ganz aus:



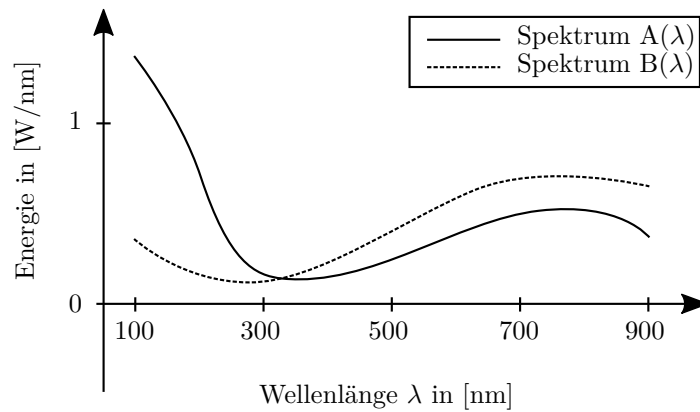
- Bei Multiple-Choice-Aufgaben mit zwei Antworten führen falsche Kreuze zu Punktabzug. Jede Teilaufgabe wird mit mindestens 0 Punkten bewertet.

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
Erreichte Punkte											
Erreichbare Punkte	13	8	14	12	18	13	14	11	6	11	120

Note



Aufgabe 1: Farben und Perzeption (13 Punkte)



- a) Gegeben sind zwei Lichtspektren, Spektrum A(λ) und Spektrum B(λ). Welches der beiden Spektren wird von einem menschlichen Betrachter als heller wahrgenommen? Begründen Sie in Stichworten! **(3 Punkte)**

- b) Berechnen Sie die *Chromatizitätswerte* zu den Tristimuluswerten im XYZ-Raum!

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.3 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$



Der Rechenweg muss erkennbar sein!

(3 Punkte)

Name: _____

Matrikelnummer: _____

- c) Welchen Vorteil kann es haben, bei der verlustbehafteten Kompression von Bildern Luminanz und Chrominanz unterschiedlich zu behandeln? **(3 Punkte)**

- d) Bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie *Wahr* oder *Falsch* ankreuzen. **(4 Punkte)**

Aussage	Wahr	Falsch
Von RGB zu XYZ kommt man durch Abbildung der Werte mit einer Matrix.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Durch mehr als drei geeignete Grundfarben lässt sich der Gamut eines physikalisch-realisierten Farbraums vergrößern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zu jedem XYZ-Tristimuluswert gibt es genau ein passendes Spektrum.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rötliche Schwarzkörperstrahlung hat eine niedrigere Farbtemperatur als bläuliche.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Aufgabe 2: Raytracing (8 Punkte)

- a) Die folgende Szene besteht aus zwei Spiegeln, einem Objekt mit diffuser Oberfläche, einer dicken Glasscheibe und einer Punktlichtquelle. Die Spiegel *reflektieren* sämtliches Licht perfekt, die Glasscheibe *transmittiert* sämtliches Licht perfekt. Die Kamera befindet sich im Vakuum ($\eta = 1$).

Der eingezeichnete Augstrahl soll mit Whitted-Style Raytracing verfolgt werden. Zeichnen Sie in das Bild die dafür benötigten Strahlen ein! Zeichnen Sie Schattenstrahlen nur ein, wenn sie für das Ergebnis *relevant* sind!

Kennzeichnen Sie die Strahlen mit

P für Primärstrahlen,

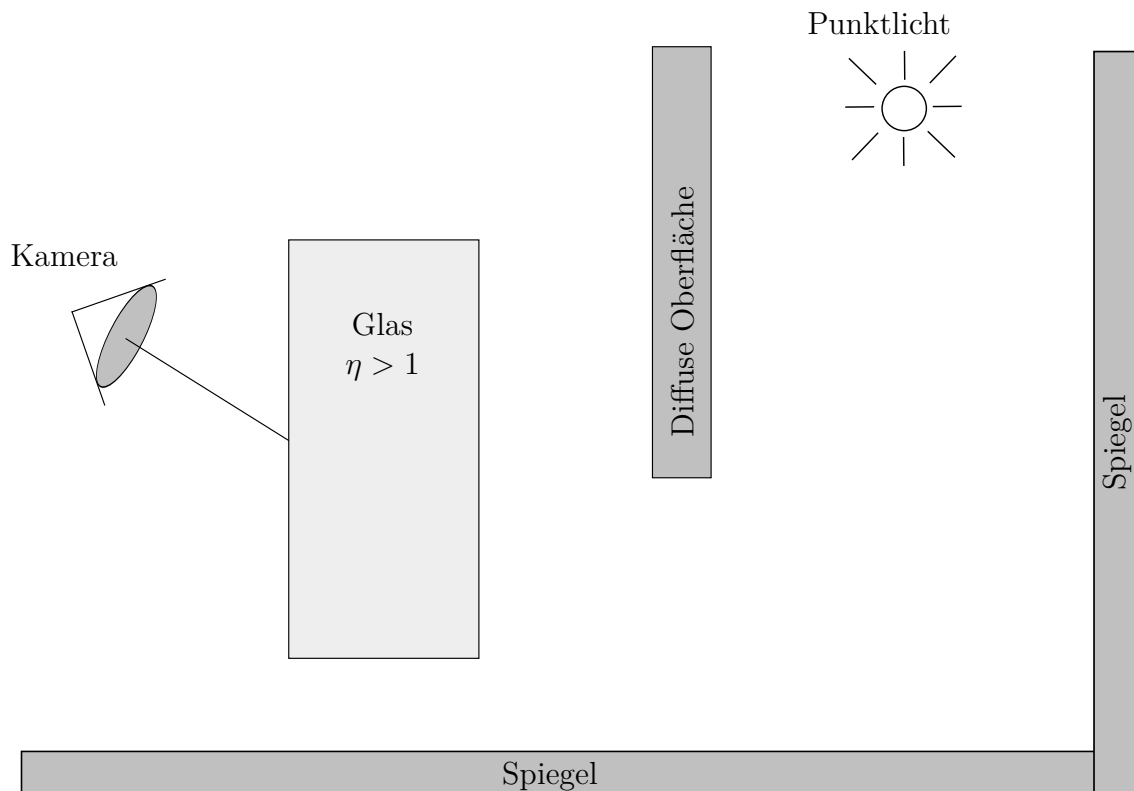
R für Reflexionsstrahlen,

T für Transmissionsstrahlen und

S für Schattenstrahlen.



(3 Punkte)



Name: _____

Matrikelnummer: _____

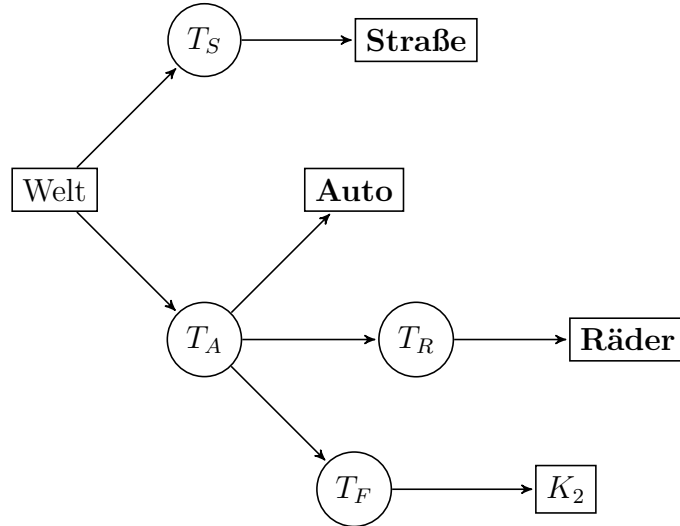
b) Die Richtung des Augstrahls in Aufgabe a) ist $\mathbf{d} = (d_x, d_y)$ und alle Objekte sind achsenparallele Quader. Wie ist die Richtung \mathbf{d}' des Strahls, der das Glas verlässt? (2 Punkte)

c) Bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie *Notwendig* oder *Optional* ankreuzen. (3 Punkte)

Bei einem Whitted-Style Raytracer ist ...	Notwendig	Optional
... Primärstrahlen erzeugen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... Strahlschnitte berechnen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... Den Fresnel-Term auswerten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... Reflexionsstrahlen rekursiv weiterverfolgen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... Mip-Maps erstellen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... Beschleunigungsstrukturen verwenden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Aufgabe 3: Transformationen (14 Punkte)

Gegeben ist ein Szenengraph, wie Sie ihn in der Vorlesung kennengelernt haben. Darin wird ein Auto mit Rädern auf einer Straße modelliert.



Die hier rund dargestellten Transformationsknoten sind jeweils mit der Transformation beschriftet, die vom lokalen in das übergeordnete Koordinatensystem überführt. Die Transformation an der Wurzel (die das Weltkoordinatensystem definiert) ist die Identität.

Vereinfachen Sie bei der Angabe von Transformationen die Ausdrücke so weit wie möglich!

- a) Die Szene soll aus der Sicht einer Kamera K_1 gezeichnet werden. Gegeben ist die dazugehörige Kameratransformation V_1 . Geben Sie die Model-View-Transformation M_1 für das Zeichnen der Räder an! **(3 Punkte)**

$$M_1 =$$

- b) Die Position eines Punktes \mathbf{A} , der im Koordinatensystem des Autos gegeben ist, soll nun im Koordinatensystem der Straße bestimmt werden (und wird dort als \mathbf{A}' bezeichnet). Geben Sie die entsprechende Berechnungsvorschrift an! **(2 Punkte)**

$$\mathbf{A}' =$$

Name: _____

Matrikelnummer: _____

- c) Die Szene soll nun aus der Sicht des Autofahrers gezeichnet werden. Dazu wird eine Kamera K_2 zusammen mit einer weiteren Transformation T_F zum Graph hinzugefügt (oben gestrichelt eingezeichnet). T_F platziert die Kamera K_2 an der Stelle des Fahrers.

Geben Sie für Kamera K_2 die Kameratransformation V_2 an! Wie lautet außerdem die vereinfachte Model-View-Transformation M_2 der Räder, wenn sie mit K_2 gezeichnet werden? (4 Punkte)

$V_2 =$

$M_2 =$

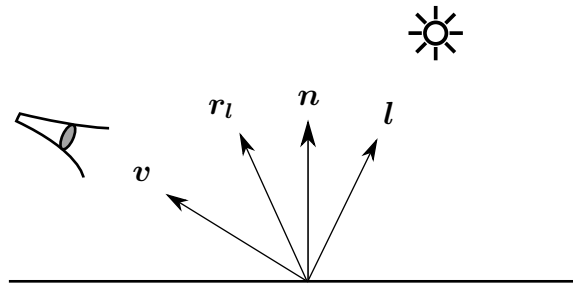
- d) Diese Aufgabe ist unabhängig vom obigen Szenengraph zu beantworten:

Bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie *Wahr* oder *Falsch* ankreuzen. (5 Punkte)

Aussage	Wahr	Falsch
Eine perspektivische Projektion ist immer eine affine Abbildung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Transformation von Punkten und dazugehörigen Normalen muss immer die gleiche Transformationsmatrix verwendet werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Homogene Transformationsmatrizen können Translationen darstellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn eine allgemeine Transformation durch eine Matrix M dargestellt wird, so führt M^T die inverse Transformation durch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bei der homogenen Transformation eines Punktes mit einer Matrix M beschreiben alle λM mit $\lambda \in \mathbb{R}, \lambda \neq 0$ dieselbe Abbildung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Aufgabe 4: Beleuchtungsmodelle und Schattierung (12 Punkte)



a) Geben Sie die Terme des Phong-Beleuchtungsmodells in Abhängigkeit der oben dargestellten Vektoren an! (4 Punkte)



b) Geben Sie an, wie sich r_l aus den übrigen der oben dargestellten Vektoren berechnen lässt! (1 Punkt)

Name: _____

Matrikelnummer: _____

c) In der Vorlesung haben Sie Flat Shading, Gouraud Shading und Phong Shading kennengelernt. Beschreiben Sie *stichpunktartig*, wie diese Verfahren die Punkte innerhalb eines Dreiecks schattieren. Für welches der Shading-Verfahren können Sie das Phong-Beleuchtungsmodell verwenden? **(7 Punkte)**



- Flat Shading:

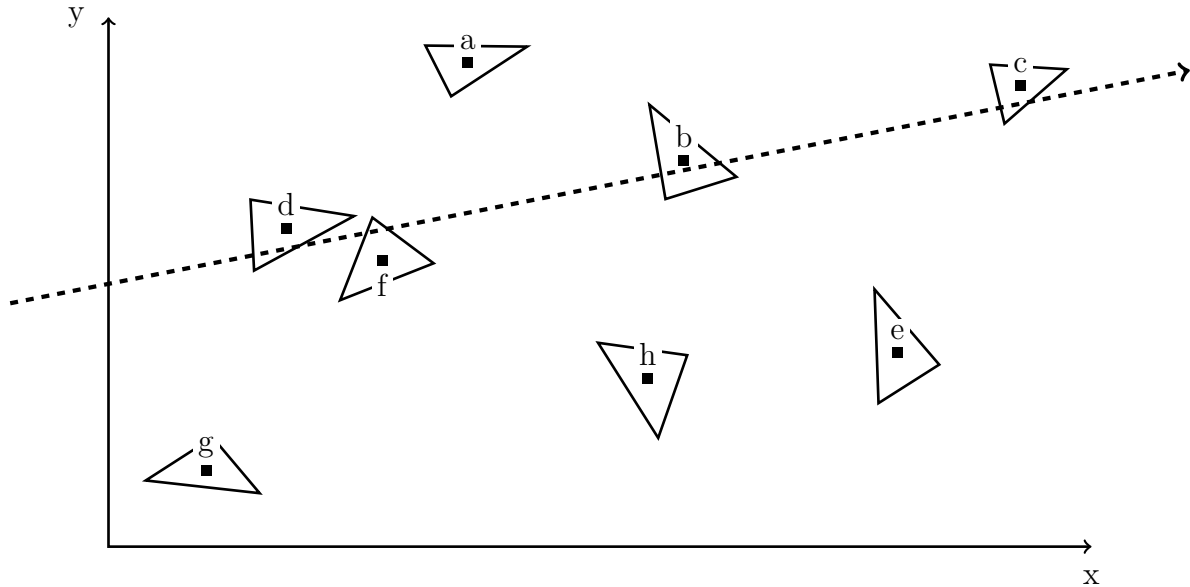
- Gouraud Shading:

- Phong Shading:

- Phong-Beleuchtungsmodell:

Aufgabe 5: Beschleunigungsstrukturen (18 Punkte)

Gegeben sind ein Strahl und eine Menge von Dreiecken mit eingezeichneten Schwerpunkten.



- a) Sie sollen zeichnerisch eine Hüllkörperhierarchie mit achsenparallelen Boxen (BVH mit AABBs) erstellen. Verwenden Sie dazu die *Objektmittel-Methode* (object median). Teilen Sie einen Knoten immer entlang der Achse mit maximaler Ausdehnung. Teilen Sie keine Knoten, die *zwei oder weniger* Primitive enthalten. Verwenden Sie die Schwerpunkte der Dreiecke als Referenzpunkte bei der Anordnung.



Zeichnen Sie die Hüllkörperhierarchie in der Abbildung ein! **(6 Punkte)**

- b) Der Strahl soll mit der Hüllkörperhierarchie aus Aufgabe a) geschnitten werden.

Geben Sie die Dreiecke, mit denen ein Schnitttest durchgeführt wird, als Liste an! Ordnen Sie die Liste nach der Reihenfolge der ausgeführten Schnitttests, wenn die Hierarchie wie in der Vorlesung besprochen traversiert wird!



Beispiel: x, y, z, w **(4 Punkte)**

Name: _____

Matrikelnummer: _____

- c) Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die Datenstrukturen, wie sie in der Vorlesung behandelt wurden. BVH ist eine Hüllkörperhierarchie mit achsenparallelen Quadern. Das Gitter ist regulär.

Kreuzen Sie jeweils die Datenstruktur an, für die die Aussage zutrifft. Wenn die Aussage für keine der Datenstrukturen gilt, kreuzen Sie *Keine* an. Sie erhalten für jede vollständig richtige Zeile einen Punkt. Nicht vollständig richtige Zeilen werden mit Null Punkten bewertet. (4 Punkte)

Aussage	BVH	kD-Baum	Gitter	Keine
Die Datenstruktur kann nicht zur Beschleunigung von Nachbarschaftssuchen verwendet werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der Aufbau der Datenstruktur ist <i>linear</i> in der Anzahl der Primitive.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mehrfache Schnitttests mit demselben Primitiv müssten explizit vermieden werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Datenstruktur eignet sich insbesondere für Szenen mit viel freiem Raum.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- d) Bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie *Wahr* oder *Falsch* ankreuzen. (4 Punkte)

Die Surface Area Heuristic ...	Wahr	Falsch
... wird beim Traversieren einer Datenstruktur eingesetzt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... kann die Traversierung eines kD-Baumes beschleunigen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... eignet sich besonders für den Aufbau von Oktalbäumen (Octrees).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... schätzt die Wahrscheinlichkeit, dass genau N Primitive in einem Teilbaum liegen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Aufgabe 6: Texturen (13 Punkte)

a) Bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie *Wahr* oder *Falsch* ankreuzen. (9 Punkte)

Aussage	Wahr	Falsch
Texturkoordinaten müssen immer im Bereich $[0, 1]$ liegen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beim Textur-Wrapping kann die Adressierung für jede Dimension separat gewählt werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anisotrope Texturfilterung sorgt im Allgemeinen dafür, dass Texturen im Vergleich zu isotroper Texturfilterung schärfer erscheinen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
RIP-Maps können als eine Verallgemeinerung von Mip-Maps angesehen werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der größte Vorteil des Sphere-Mapping gegenüber Latitude/Longitude-Maps besteht darin, dass die Abbildung keine Singularität(en) beinhaltet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Durch Mip-Mapping wird der Speicheraufwand für Texturen um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bei der Verkleinerung (Minification) werden mehrere Bildschirm-Pixel auf den selben Texel abgebildet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mittels Summed Area Tables kann man über zwei Texturzugriffe die Summe über eine rechteckige Region in einer Textur berechnen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Für die bilineare Filterung muss der Abdruck (Footprint) eines Pixels im Texturraum bestimmt werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Name: _____

Matrikelnummer: _____

b) Nennen Sie jeweils genau einen Vorteil und einen Nachteil von 3D-Texturen bei der Texturierung von Oberflächenmodellen! **(2 Punkte)**

c) Nennen Sie den grundlegenden Unterschied zwischen Normal-Mapping und Displacement-Mapping! **(2 Punkte)**



Aufgabe 7: OpenGL-Beleuchtung mit Environment-Maps (14 Punkte)

In dieser Aufgabe soll ein Beleuchtungsmodell, bestehend aus einer diffusen und einer perfekt spiegelnden Komponente, im Fragment-Shader implementiert werden. Als Lichtquelle wird eine Environment-Map verwendet. Für die diffuse Reflexion wurde eine vorgefilterte Version der Environment-Map vorberechnet. Für die perfekt spiegelnde Reflexion soll die ursprüngliche Environment-Map ausgelesen werden. Die diffuse und perfekt spiegelnde Reflexion sollen anhand eines approximierten Fresnel-Terms

$$F = r_c + (1 - r_c)(1 - \cos \theta)^5$$

kombiniert werden. Dabei ist θ der Winkel zwischen Normale \mathbf{n} und Vektor zur Kamera \mathbf{v} . Der Reflexionskoeffizient r_c und der Materialparameter k_d für die diffuse Reflexion sollen aus einer Textur ausgelesen werden. Die Environment-Maps liegen als Cube-Maps vor. Auf die Texturen können Sie mit den Funktionen

```
vec4 texture(samplerCube sampler, vec3 direction);  
vec4 texture(sampler2D sampler, vec2 texCoord);
```

zugreifen.

Vervollständigen Sie den Fragment-Shader auf der nächsten Seite!

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Vervollständigen Sie den folgenden Fragment-Shader!

(14 Punkte)



```
uniform samplerCube tEnv;           // Environment-Map
uniform samplerCube tEnvFiltered; // vorgefilterte Environment-Map
uniform sampler2D tRC;             // RGB-Textur, die  $r_c$  enthält
uniform sampler2D tKD;             // RGB-Textur, die  $k_d$  enthält

in vec3 v; // interpolierter View-Vektor (zur Kamera hin) in Weltkoordinaten
in vec3 n; // interpolierte Normale in Weltkoordinaten
in vec2 tc; // interpolierte Texturkoordinate

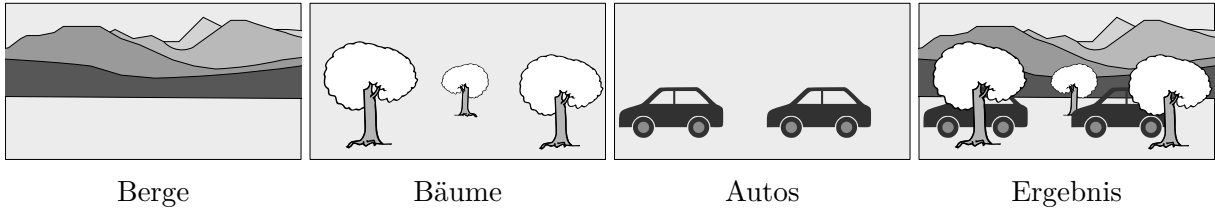
out vec3 color;

void main()
{
```

```
}
```



Aufgabe 8: OpenGL-Compositing im Fragment-Shader (11 Punkte)



Um eine aufwändige Autovisualisierung in Echtzeit umzusetzen, wird eine Szene in mehrere Komponenten unterteilt. In einem ersten Schritt wurden Berge, Bäume und Autos separat in drei Texturpaare gerendert, die jeweils Tiefenwerte in normalisierten Gerätekoordinaten (NDC) sowie Farbe und Opazität (RGBA) speichern.

Im zweiten Schritt werden die vorberechneten Texturen kombiniert. Die Berge wurden schon in den Framebuffer gezeichnet und sind weiter entfernt als die anderen Teile. Nun wird für jeden Pixel des Framebuffers ein Fragment-Shader ausgeführt, der die Texturen der Bäume und Autos unter Beachtung der Opazitäts- und Tiefenwerte kombiniert. Diesen Fragment-Shader sollen Sie implementieren.

Das OpenGL-Blending bei der Ausführung des Shaders ist folgendermaßen konfiguriert:

```
glEnable(GL_BLEND)
glBlendEquation(GL_ADD)
glBlendFunc(GL_ONE, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA)
```

Stellen Sie sicher, dass die Ausgabefarbe des Fragment-Shaders den richtigen Alpha-Wert erhält!

Vervollständigen Sie den Fragment-Shader auf der nächsten Seite!

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Vervollständigen Sie den folgenden Fragment-Shader!

(11 Punkte)



```
uniform sampler2D tCarColor; // RGBA-Farbtexur der Autos
uniform sampler2D tTreeColor; // RGBA-Farbtexur der Bäume
uniform sampler2D tCarDepth; // Tiefentexur der Autos in NDC
uniform sampler2D tTreeDepth; // Tiefentexur der Bäume in NDC
```

```
in vec2 tc; // interpolierte Texturkoordinate
out vec4 color; // Ausgabefarbe des Fragments
```

```
void main()
```

```
{
```

```
    // Tiefe und Farbe der Autos.
```

```
    float dCar = texture(tCarDepth, tc).r;
```

```
    vec4 cCar = texture(tCarColor, tc);
```

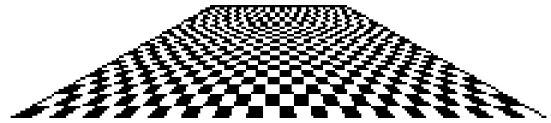
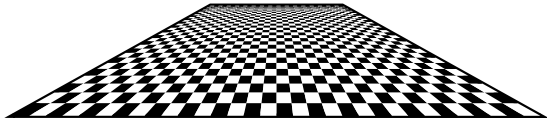
```
    // Tiefe und Farbe der Bäume.
```

```
    float dTree = texture(tTreeDepth, tc).r;
```

```
    vec4 cTree = texture(tTreeColor, tc);
```

```
}
```

Aufgabe 9: OpenGL-Schachbrett (6 Punkte)



Sie sollen ein Schachbrett wie im linken Bild mit OpenGL darstellen. Durch die Rasterisierung entstehen Artefakte, die Sie im *oberen Teil des rechten Bildes* sehen können.

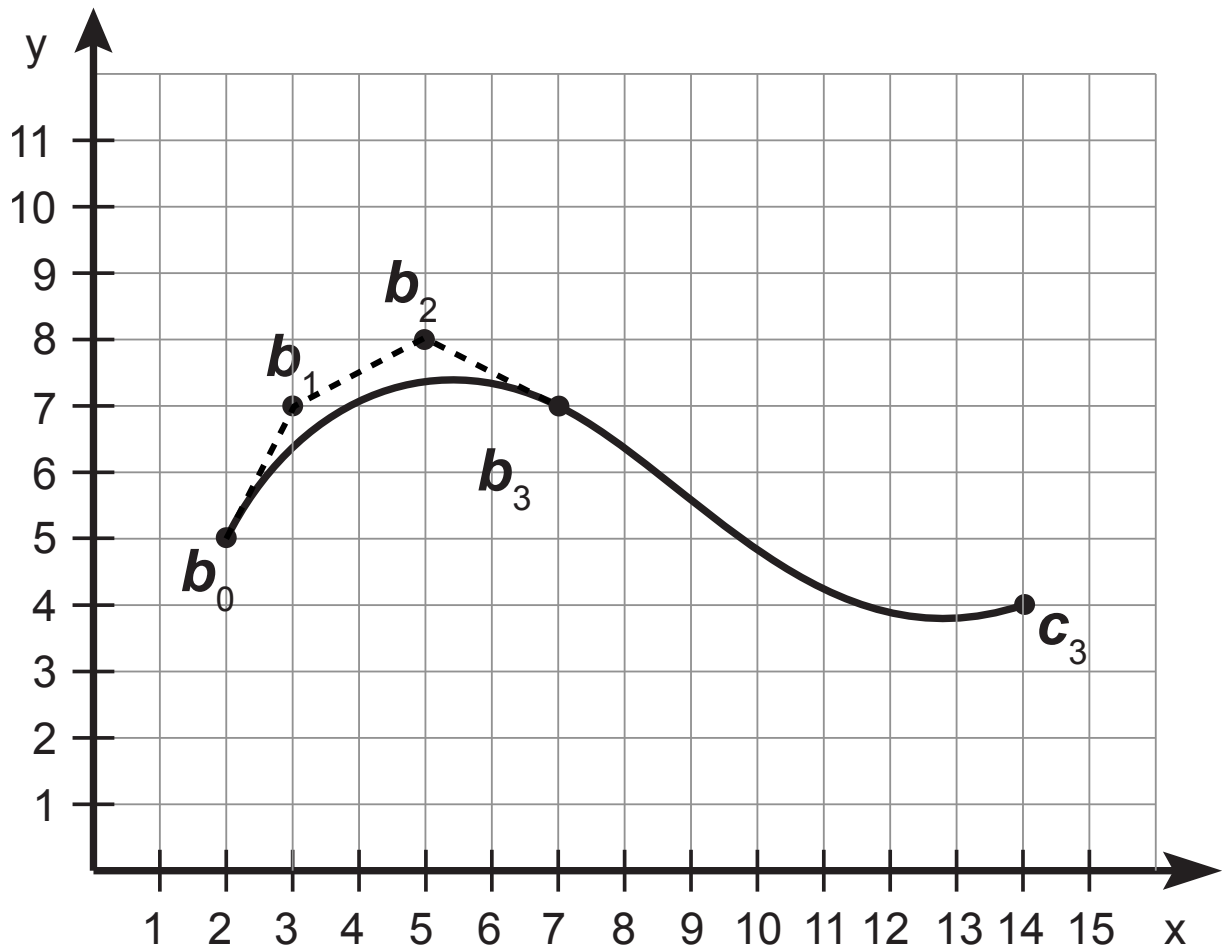
a) Warum entstehen diese Artefakte? (2 Punkte)

b) Welche der folgenden Möglichkeiten bevorzugen Sie für diese Szene, um die Artefakte aus Teilaufgabe a) so weit wie möglich und möglichst performant zu reduzieren?

Modellierung der Szene mittels ...	
...einfarbiger Quads.	<input type="checkbox"/>
...eines einzelnen Quads und einer Textur.	<input type="checkbox"/>

Begründen Sie Ihre Antwort! Geben Sie in Stichpunkten an wie, und durch welche Technik die Artefakte reduziert werden! (4 Punkte)

Aufgabe 10: Bézier-Kurven (11 Punkte)



- a) Gegeben sei die kubische Bézier-Kurve $\mathbf{b}(u) = \sum_{i=0}^3 \mathbf{b}_i B_i^3(u)$ mit den Bernsteinpolynomen $B_i^3(u)$ und Kontrollpunkten $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$.

Eine zweite Bézier-Kurve $\mathbf{c}(v) = \sum_{i=0}^3 \mathbf{c}_i B_i^3(v)$ soll C^2 -stetig angeschlossen werden. Der Punkt \mathbf{c}_3 ist bereits vorgegeben.

Konstruieren Sie zeichnerisch die Lage der noch fehlenden Kontrollpunkte $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1$ und \mathbf{c}_2 so, dass der resultierende Bézier-Spline C^2 -stetig im Anschlusspunkt ist. **(5 Punkte)**



- b) Geben Sie die Formeln an, mit denen man die Lage der drei neuen Punkte aus Teilaufgabe a) berechnet. **(3 Punkte)**

$$\mathbf{c}_0 =$$

$$\mathbf{c}_1 =$$

$$\mathbf{c}_2 =$$

- c) Welche Eigenschaft des de Casteljau-Algorithmus erlaubt das schnelle Zeichnen einer Bezierkurve mit einem Kantenzug? **(3 Punkte)**