

COMPUTER GRAPHIK

4. Teil

REFLEXIONEN: „BRDFS“

Prof. Dr. Elke Hergenröther

Wichtig! Inhalte der Veranstaltung sind urheberrechtlich geschützt. Weder die Folien noch das Vorlesungsvideo dürfen an unbeteiligte Dritte weitergegeben werden.

Placet:

Platzieren von Objekten in der Realen Welt (Koop. FB Media, Projekt Fuels)

Andreas Sturm, Sven Appel,
Prof. Paul Grimm

Prof. Dr. Elke Hergenröther



Problemstellung/Motivation

- Darstellung von virtuellen Objekten an ihrer korrekten geographischen Position in einer Meta Quest AR App
- Meta Quest hat kein GPS
- Unity Koordinatensystem richtet sich immer nach der Ausrichtung der Brille
- *Fragestellung: Wie kommt man an GPS Daten, um Objekte geographisch Korrekt in AR auf der Meta Quest positionieren zu können.*

Lösungsansatz: Geokoordinaten von einer Handy-App auf Meta Quest übertragen und Koordinatensystem auf Brille entsprechend ausrichten.

Konzept/Methodik

Latitude/Longitude: 49,865203°, 8,658830°
Horizontal Accuracy: 1,005185m
Altitude: 224,06m
Vertical Accuracy: 1,11m
Eun Rotation: (0.6, -0.5, -0.3, 0.5)
Orientation Yaw Accuracy: 2,5°

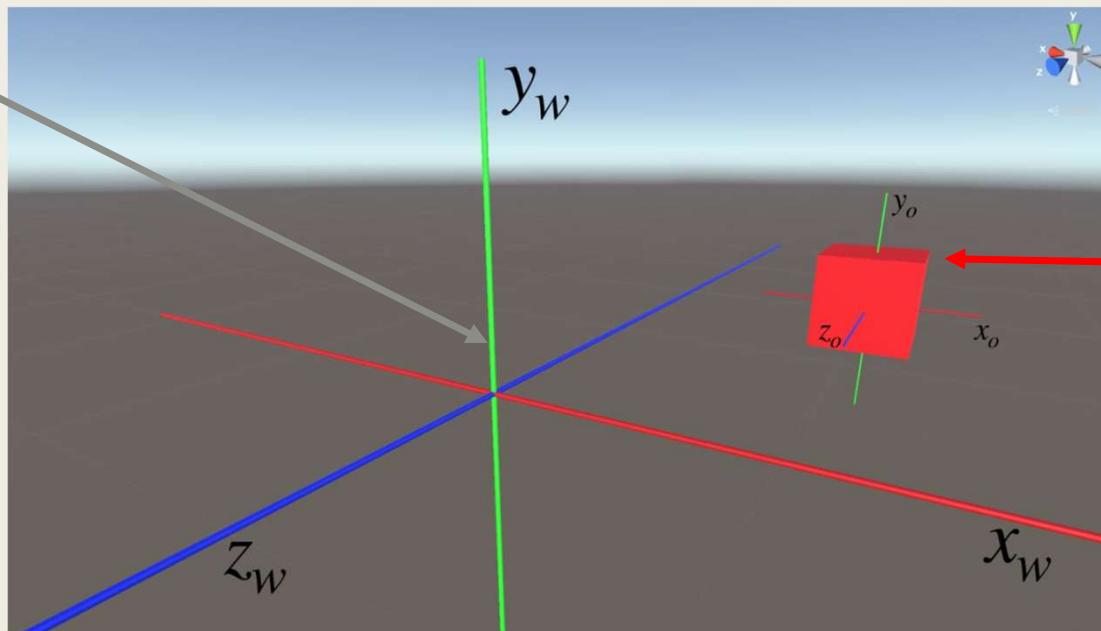
- Meta Quest Passthrough: Kameras der Brille scannt mit Passthrough/AR den QR Code, welcher die Geoinformationen Enhält. Objekt an der Stelle des gescannten QR Codes wird im Unity Raum der Meta AR App erzeugt.
- Scan enhält Geokoordinaten inkl Rotation, sowie Information über zu spawnende Objekte
- EUN Rotation: Quaternion, das die Drehung des Zielobjekts relativ zu einem global festen Koordinatensystem (reale Welt) ausdrückt

→ *In Unserem Fall: Das Smartphone gegenüber der Himmelsrichtungen NSWE*

Berechnung des relativen Versatzes anhand der Geolocation im QR Code



Wo befindet sich
das gescannte
Objekt im Unity
Raum?



Wohin zeigt
das Handy
und die
angezeigte
Geolocation
des QR
Codes?

Quelle: <https://www.codinblack.com/coordinate-spaces-and-transformations-between-them/>

Ausrichtung des Koordinatensystems und korrekte Positionierung der virtuellen Objekte

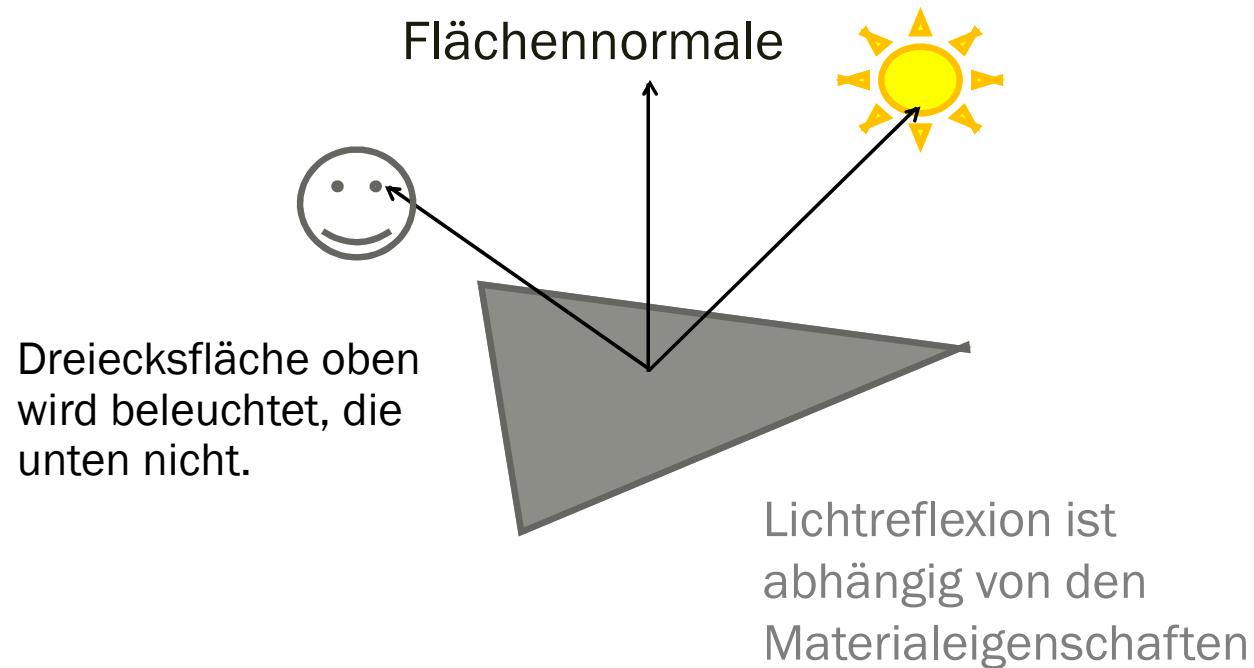
- Über die Informationen des gescannten QR Codes und dessen Objekt im Unity Raum können wir nun die Information gewinnen, in welche Himmelsrichtung das Objekt zeigt (EUN Quaternion).
- Nach der Konvertierung der Geokoordinaten (der Rotation Real-World-rotation) in das Unity Koordinatensystem der Meta Quest AR App, können wir nun die Relative Nord-Ausrichtung für unsere Meta Quest App berechnen (Azimuth Angle).

Feature	ARCore E-U-N Frame (Used by <code>EunRotation</code>)	Unity World/Transform Space
System	Right-Handed (Earth-fixed)	Left-Handed
X+ Axis	East (E)	Right (Right Vector)
Y+ Axis	Up (U) (Local Gravity Up)	Up (Up Vector)
Z+ Axis	North (N) (True North)	Forward (Forward Vector)

$$\mathbf{q}_{Unity} = (-x, -y, -z, w)_{\mathbf{q}_{ARCore}}$$

Video von Sven Appel zeigen ...

Berechnung der Oberflächendarstellung

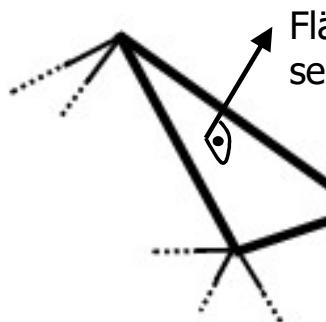


Unterschiedliche Varianten von Normalen

1. Variante: Flächennormalen



Ikosaeder



Flächennormale steht
senkrecht auf der Fläche.

Verwendung von Flächennormalen: Flat Shading

Verfahren:

- Für jede Fläche gibt es nur eine Normale.
- Dadurch erhält jede Fläche (Facette) eine einheitliche Beleuchtung*).
- D.h. jede Fläche besitzt **nur ein Farbton**



Nachteil:

- Da die meisten Objektoberflächen gekrümmmt sind, ist die Qualität der Ergebnisse meist schlecht.

Vorteil:

- sehr einfache und sehr schnelle Beleuchtungsberechnung!

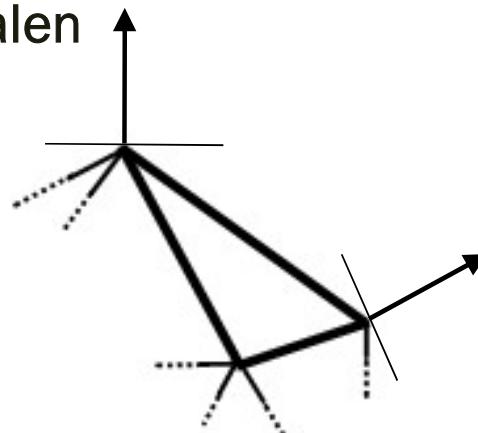
*) Beleuchtung wird meist mit dem Phong'schen Beleuchtungsmodell berechnet.

Unterschiedliche Varianten von Normalen

2. Variante: Eckennormalen



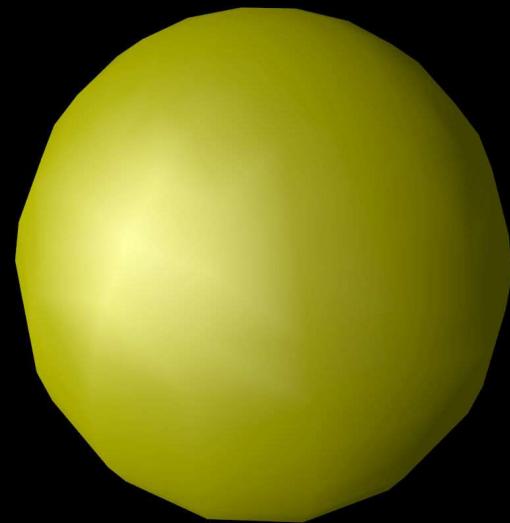
Ikosaeder



**Eckennormalen stehen
senkrecht auf der
Tangentialebene ...
... und **NICHT** wie die
Flächennormale senkrecht auf
der Fläche!**

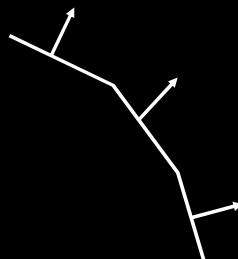
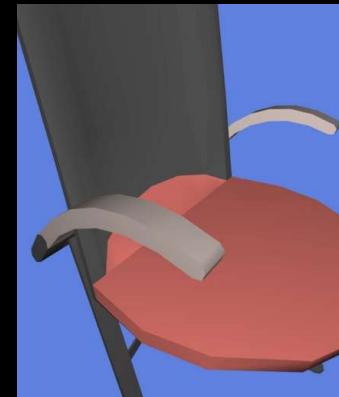
Verwendung von Eckpunktnormalen: Gouraud Shading

- Beleuchtungsberechnung *) wird für jeden Eckpunkt durchgeführt.
- D.h. pro Dreieck werden drei unterschiedliche Farben (Helligkeiten) berechnet
- Die Farben der Pixel innerhalb des Dreiecks werden durch bilineare Interpolation berechnet
- Dadurch entsteht eine **optische Glättung** – ohne Ände Geometrie vornehmen zu müssen.
- Optische Glättung bewirkt ein „kaschieren“ der Kanten, die nicht zur Kontur gehören!



*) Beleuchtung wird meist mit dem Phong'schen Beleuchtungsmodell berechnet.

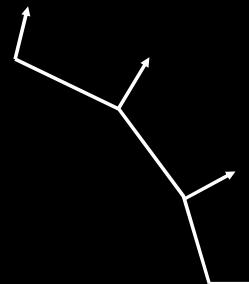
Flat Shading versus Gouraud Shading



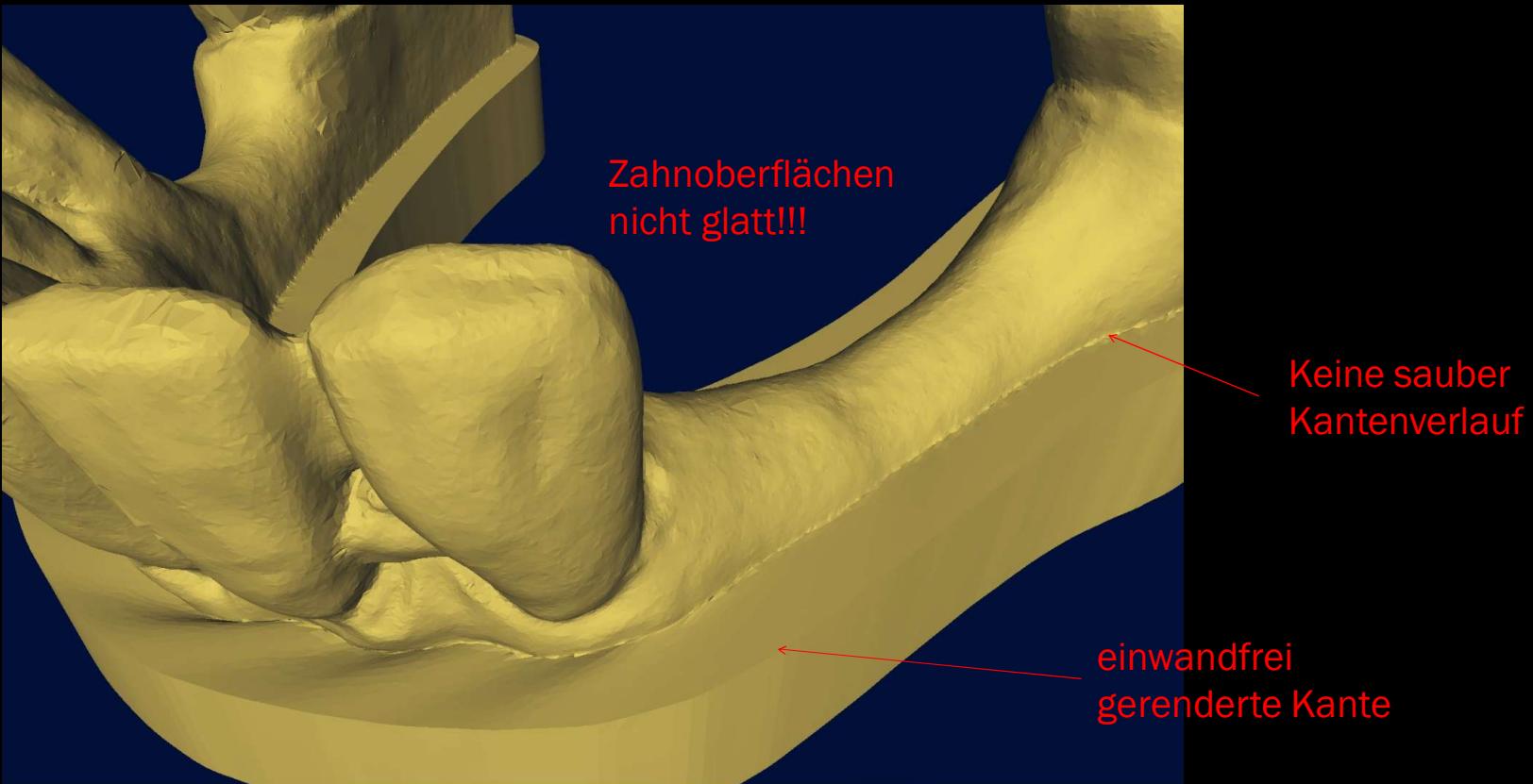
Ergebnis ist abhängig von den berechneten Normalen:

Links: Flächennormalen

Rechts: Eckpunktnormalen



Ausgangssituation im Praktikum: CAD-Daten im STL-Format visualisiert mit Flat Shading



Ergebnis nach Verwendung des Gouraud-Shadings, also mit Eckpunktnormalen



Zusammenfassung des Reflexionsmodells von Phong

Wie rechnet man damit in RGB und funktioniert das auch im HSV-System?
Greifen wir später nochmal beim Ray Tracing auf.

$$I_{ges} = I_a \cdot k_a + I_e \cdot k_d \cdot (n \cdot l) + I_e \cdot k_s \cdot (r \cdot v)^n$$


Ambiente Reflexion

Diffuse Reflexion
Spiegelnde inkl.
brechender
Reflexion

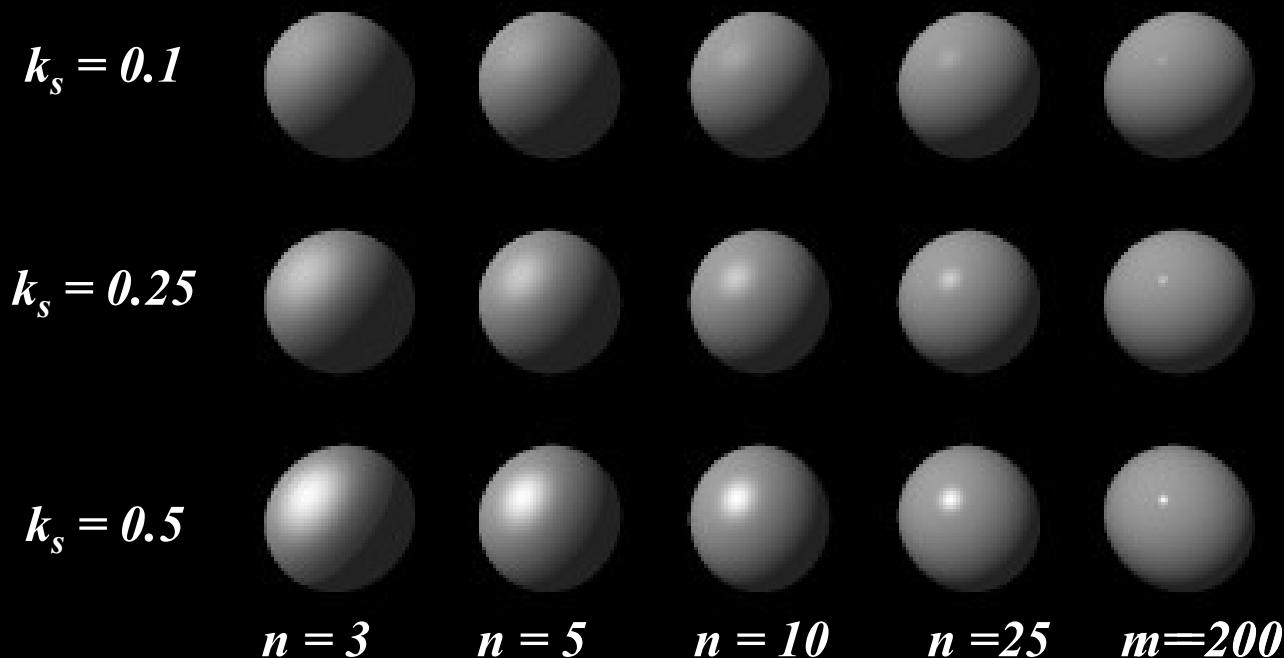
$$I_{ges} = I_a \cdot k_a + I_e \cdot k_d \cdot \cos(\theta) + I_e \cdot k_s \cdot \cos(\alpha)^n$$


Ambiente Reflexion

Diffuse Reflexion
Spiegelnde inkl.
brechender
Reflexion

Modellierung des Materials in Phong:

Alle Materialien bestehen aus einer Kombination von spiegelnden und diffusen Eigenschaften.



Für alle gilt: $k_d=0.45$, $k_a=0.1$ und $I_a=I_e=1$ entnommen aus Foley et. al



KUNSTSTOFFE SIND EIN IDEALES
MATERIAL ZUR REFLEXIONSBE-
RECHNUNG NACH PHONG

Die Materialien in der Realität haben sehr unterschiedliche Reflexionsverhalten:



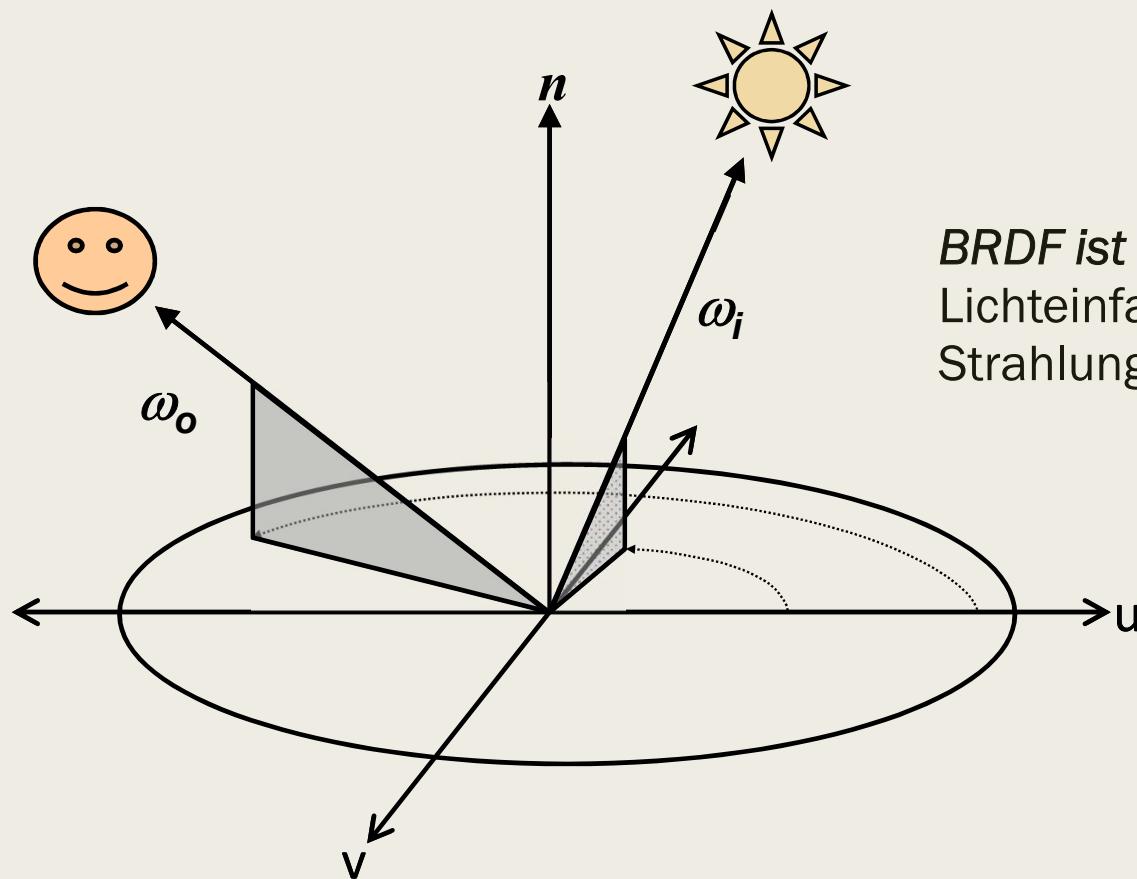
*Das Phong'sch
Reflexionsmodell
genügt nicht, um all
diese Varianten zu
modellieren.*

Bild rechts oben: <https://www.my-spexx.de/brillen-ratgeber/farb-und-stilberatung/haarfarbe-mit-brille/>

Bild links: <http://www.bolidgmbh.de/index.php?id=121>

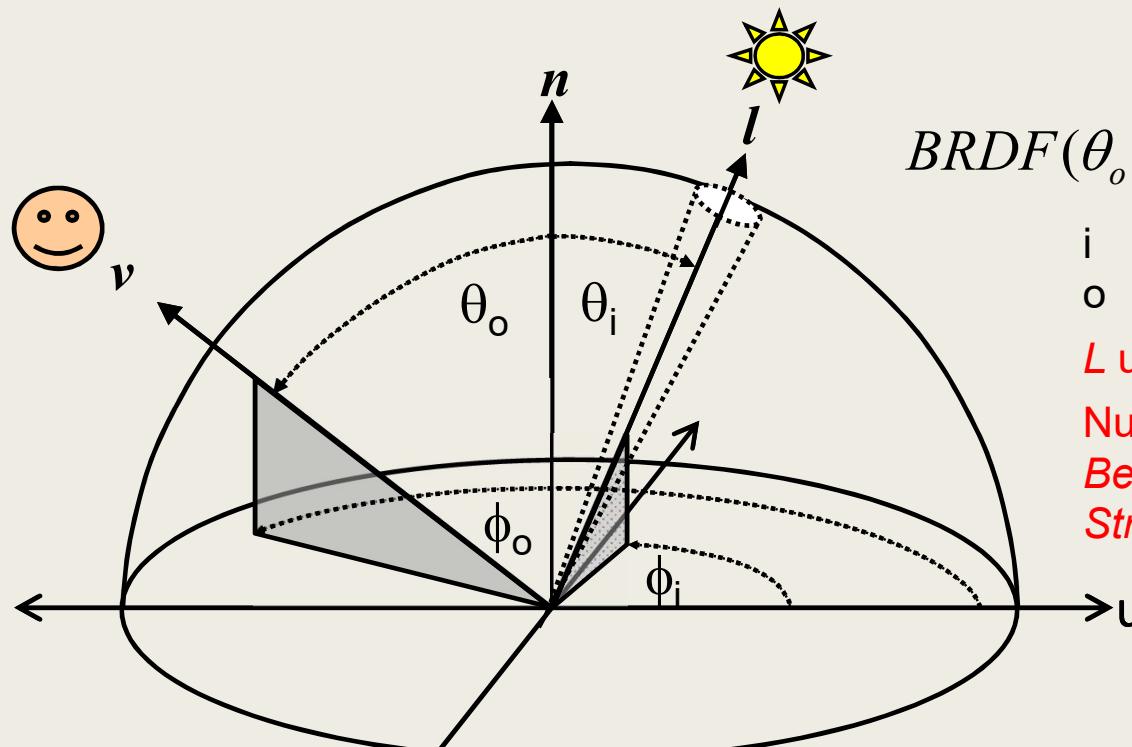
Bild rechts unten: <https://www.gewerbeakademie.de/digitale-zahntechnik/%C3%BCberbetriebliche-ausbildung/zahn-6fr-keramik/>

Bidirectional Reflection Distribution Function



BRDF ist eine Funktion, die für jeden Lichteinfallswinkel, die reflektierende Strahlung in alle Richtungen angibt.

Bidirectional Reflection Distribution Function



$$BRDF(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_o(\theta_o, \phi_o)}{E_i(\theta_i, \phi_i)}$$

i = Input
 o = Output

L und E: Erklärung folgt!

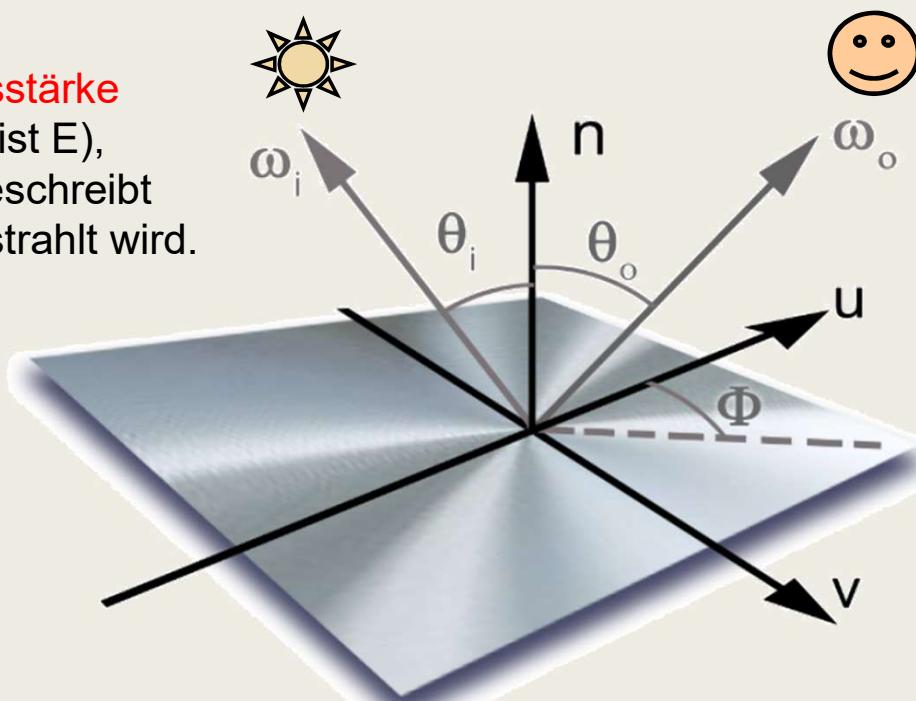
Nur soviel vorweg:

Bestrahlungsstärke E = Energie pro Fläche
Strahlungsdichte L = Energie in eine Richtung

BRDF beschreibt das Verhältnis der reflektierten Strahlungsdichte L_o zur einfallenden Bestrahlungsstärke E_i

Bidirectional Reflection Distribution Function

ω_i ist die **Bestrahlungsstärke** (physikalische Größe ist E), welche die Energie beschreibt mit der die Fläche bestrahlt wird.



ω_o ist die **Leuchtdichte** (physikalische Größe ist L), welche die Energie, die in die Richtung des Betrachters abgegeben wird, beschreibt.

Bild aus: http://www.gmrv.es/Publications/2019/VCGL19/vidaurre_WACV2019.pdf

Bidirectional Reflection Distribution Function

Was passiert, wenn ich die Metallplatte drehe?

Betrachter und Lichteinfall bleiben konstant.

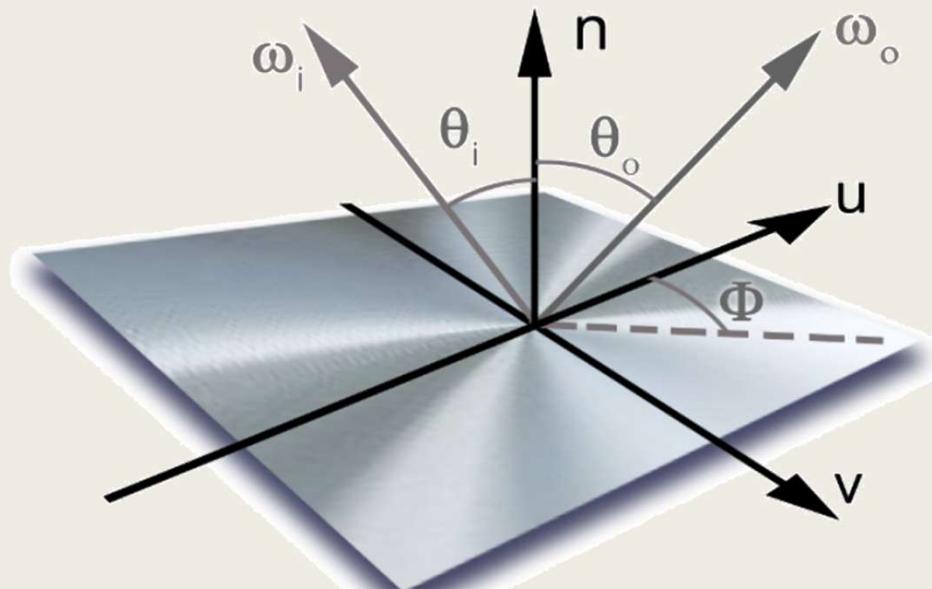


Bild aus: http://www.gmrv.es/Publications/2019/VCGL19/vidaurre_WACV2019.pdf

Bidirectional Reflection Distribution Function

Ein optisch aussagekräftiges Ergebnis erhält man, wenn man statt der Metallplatte eine Stoffprobe nutzt:



Stoffprobe in der Ausgangslage



Stoffprobe gedreht

Beide Materialien (Satinstoff – Bilder links und angerautes Metall – Bild unten) sind anisotrop

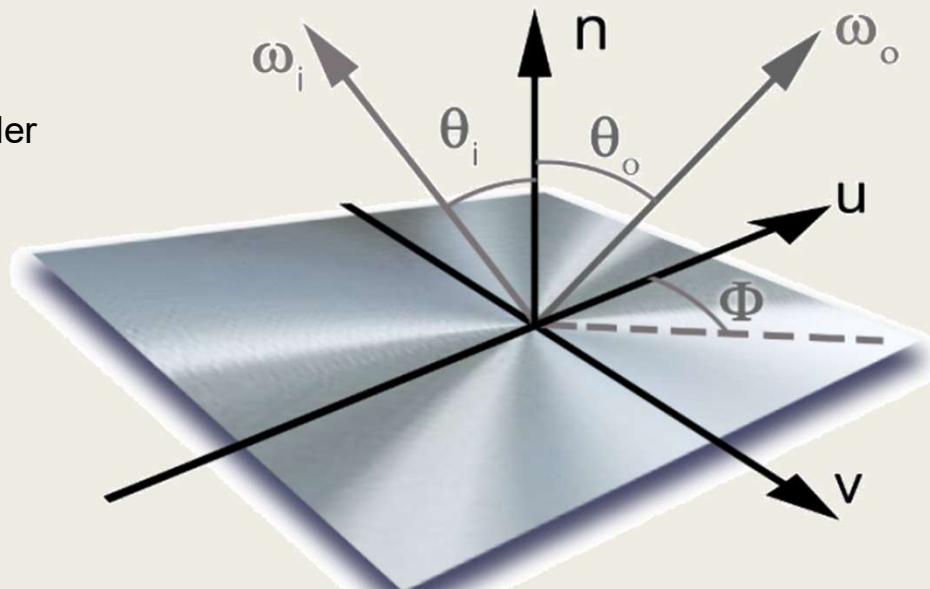
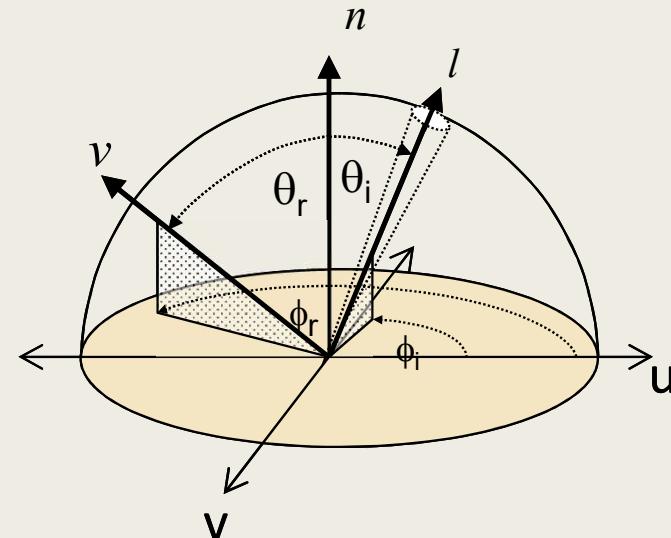


Bild aus: http://www.gmrv.es/Publications/2019/VCGL19/vidaurre_WACV2019.pdf

Isotrope und anisotrope Materialien

Definition von isotropen Materialien:

- Oberfläche (in Ocker eingezeichnet) kann um die Flächennormale gedreht werden, ohne dass sich die BRDF verändert
- Beispiel: Plastikoberfläche
Poliertes Metall



Definition von anisotropen Materialien:

- Wenn die Oberfläche um die Flächennormale gedreht wird, ändert sich auch die BRDF
- Beispiele: gebürstetes Metall, Stoffgewebe (Samt, Kord, Haare)

Die wesentlichen Eigenschaften einer BRDF:

- Helmholtz-Reziprozität

Wert der BRDF ändert sich nicht, wenn man Einfalls- und Ausfallsstrahlung vertauscht. Eine Energieabsorption findet also per Definition nicht statt (siehe auch: https://de.qwertyu.wiki/wiki/Helmholtz_reciprocity). Damit ist die BRDF energieerhaltend.

- BRDF misst die Reflektion an genau einer Position der Oberfläche
- Zwei Lichtstrahlen, die im gleichen Punkt auf die Oberfläche auftreffen beeinflussen sich nicht.

Welche Aussage ist richtig?

- a. BRDFs sind Funktionen, die für jede Blickrichtung des Betrachters und jeden Lichteinfallswinkel in der positiven Hemisphäre einen Reflexionswert zurück geben.
- b. BRDF = Bidirectional Reflection Diffusion Function
- c. BRDF kann die Reflexion semitransparenten Materialien, wie Haut oder milchiges Glas beschreiben.

Um die BRDF integrieren zu können, muss die Phong'sche Reflexionsgleichung angepasst werden

$$I_{ges} = I_a \cdot k_a + I_e \cdot k_d \cdot (n \cdot l) + I_e \cdot k_s \cdot (r \cdot v)^n$$

Ambiente Reflexion Diffuse Reflexion

Spiegelnde inkl.
brechender
Reflexion

$$I_{ges} = I_a \cdot k_a + I_e \cdot k_d \cdot \cos(\theta) + I_e \cdot k_s \cdot \cos(\alpha)^n$$

Ambiente Reflexion Diffuse Reflexion

Spiegelnde inkl.
brechender
Reflexion

Um die BRDF integrieren zu können, muss die Phong'sche Reflexionsgleichung angepasst werden

$$I_{ges} = I_a \cdot k_a + I_e \cdot k_d \cdot (n \cdot l) + I_e \cdot k_s \cdot (r \cdot v)^n$$

Ambiente Reflexion Diffuse Reflexion

Spiegelnde inkl.
brechender
Reflexion

Die Energie, die bei Phong als **Strahlungsstärke** bzw. **Strahlungsintensität** (*Symbol: I*) beschrieben wurde, muss nun umformuliert werden und auf den Größen **Leuchtdichte** (*Symbol L*) und **Bestrahlstärke** (*Symbol E*) aufbauen.

Ergebnis der Umformulierung ist die Rendering Gleichung ...

Rendering Gleichung nach Jim Kaija

$$L_r(x, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}') L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}'$$

$L_r(x, w)$: Reflektierte Strahldichte zum Betrachter am Punkt x

$L_e(x, w)$: Selbstleuchtende Strahldichte zum Betrachter am Punkt x

$f_r(x, w, w')$: Bidirektionale Reflexion Distribution Funktion am Punkt x

$L_i(x, w')(w \cdot n)$: Einfallende Strahldichte am Punkt x proportional zum Cosinus vom Winkel zw. n und w' ($=w \cdot n$)

n : Normale am Punkt x

w : normalisierter Vektor vom Punkt x zum Betrachter

w' : normalisierter Vektor vom Punkt x zum einfallenden Licht

Die Rendering Gleichung gibt es in verschiedenen Varianten.

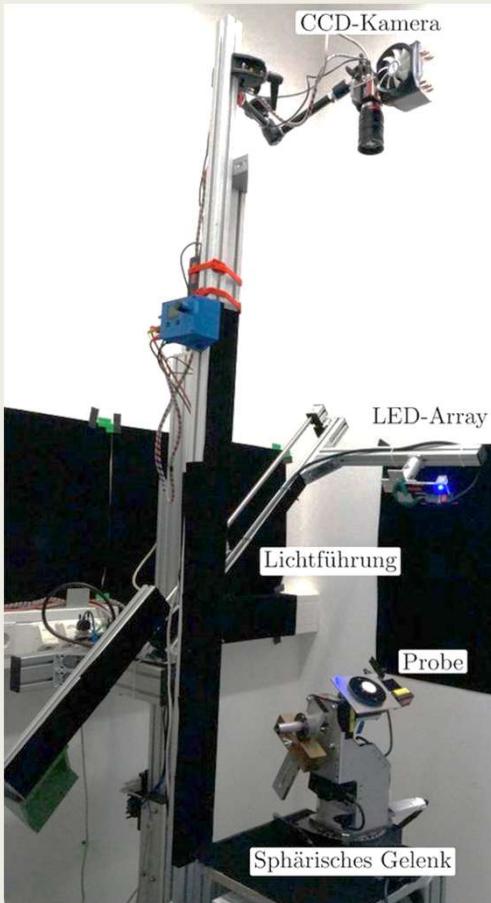
Die physikalischen Größen I, L, E etc. müssen noch erklärt werden!

Formel aus: https://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/smt/cg/teaching/lectures/CG3WS0203/secure/renderGleichung_script.pdf

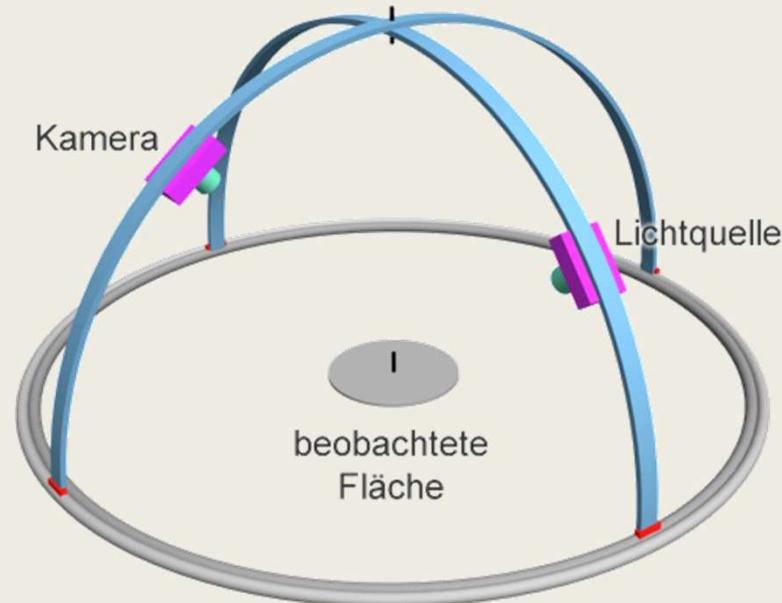
Wie ermittelt man die „Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion“ BRDF?

- Per Gonioreflektor (speichern als „Look Up Tables“)
- Mittels Texturinformation (BTF)
- Analytisch
 - Also: *mathematische Beschreibung der Funktion*
 - *Beispiel: Reflexionsmodell von Cook und Torrance*

Bidirectional Reflection Distribution Function



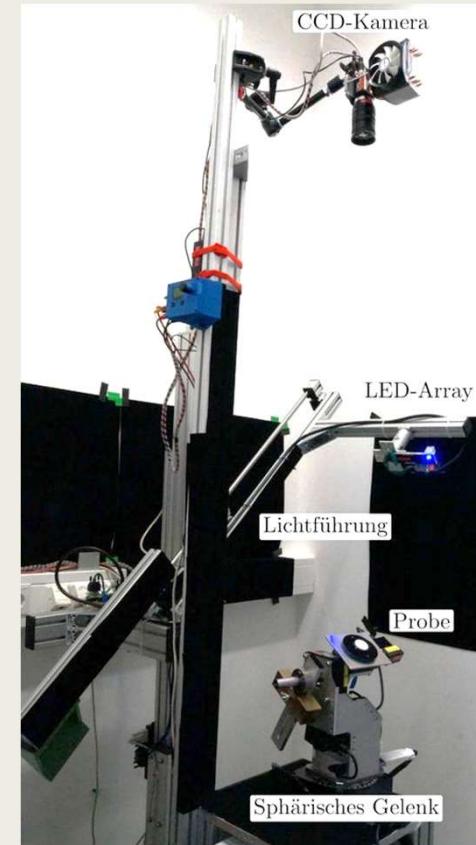
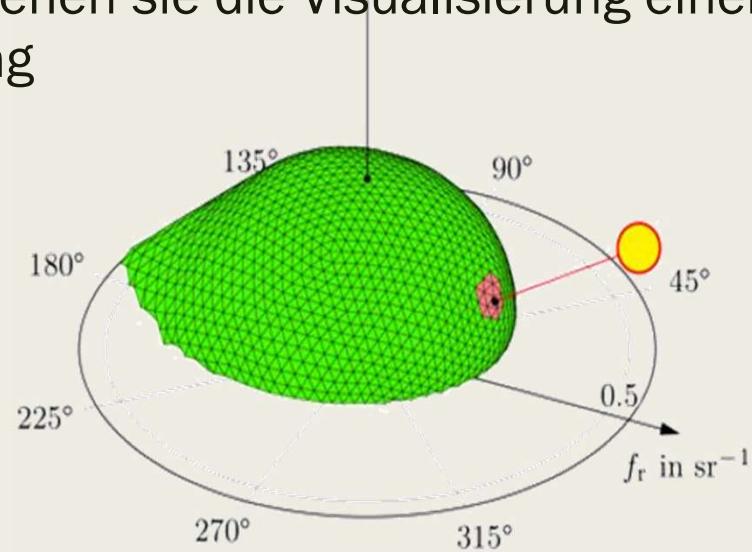
Zwei unterschiedlich gebaute Gonioreflektometer, die beide die BRDF von realen Materialien messen



Bidirectional Reflection Distribution Function

Die BRDF ist ein 3-dimensionales Ergebnis einer Funktionsberechnung oder einer Messung

Unten sehen sie die Visualisierung einer Messung



“Design, Calibration and Evaluation of a Camera-based Gonioreflectometer” von Andreas Winkler

<https://www.jku.at/en/institute-for-measurement-technology/research/phd-projects/design-calibration-and-evaluation-of-a-camera-based-gonioreflectometer/>

Roboter gestützte Reflexionsmessung

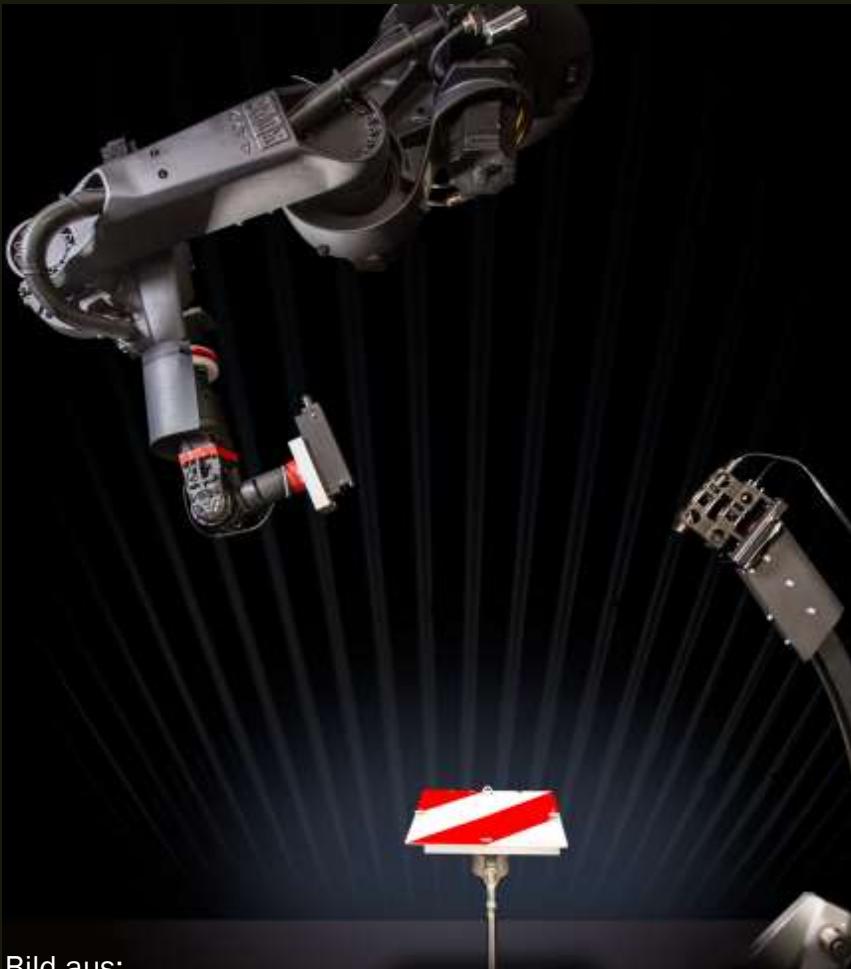
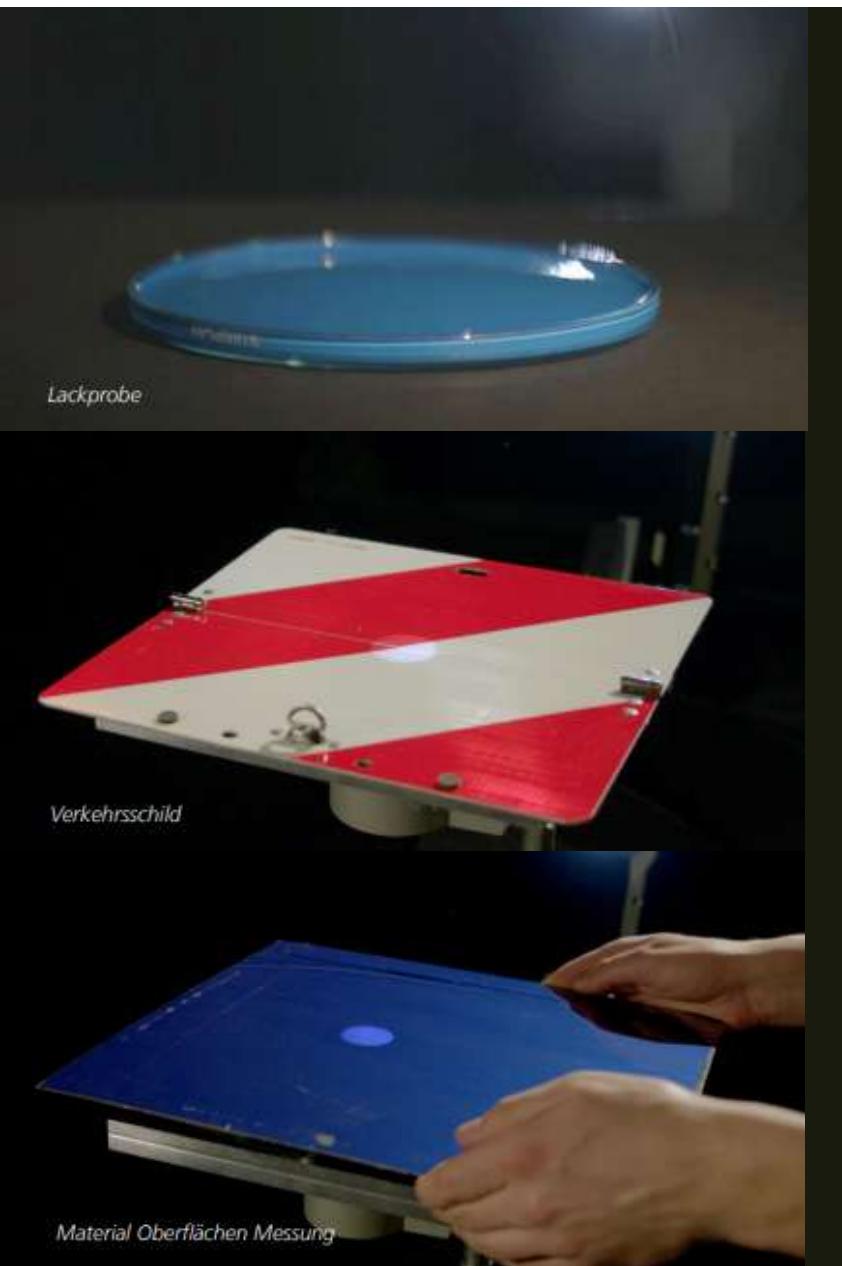


Bild aus:

https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/68794/BRDF_de.pdf?command=downloadContent&filename=BRDF_de.pdf

Diverse Materialproben für die Roboter gestützte Reflexionsberechnung

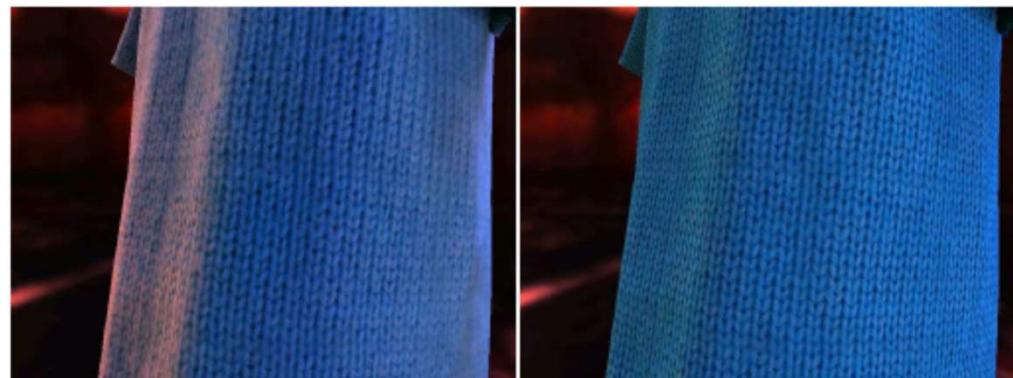
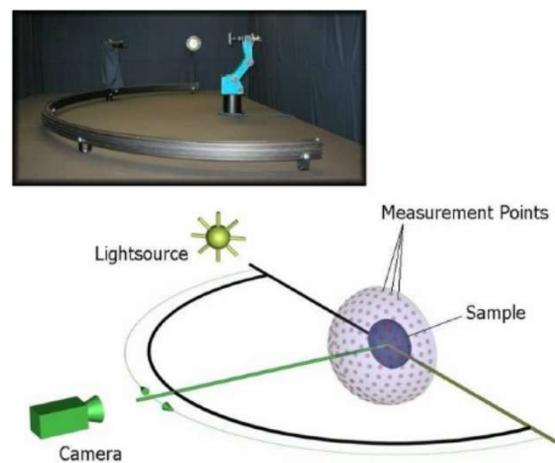


Bilder aus:
https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/68794/BRDF_de.pdf?command=downloadContent&filename=BRDF_de.pdf

Wie ermittelt man die „Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion“ BRDF?

- Per Gonioreflektor (speichern als „Look Up Tables“)
- Mittels Texturinformation (BTF)
- Analytisch
 - Also: *mathematische Beschreibung der Funktion*
 - *Beispiel: Reflexionsmodell von Cook und Torrance*

BTF (*bidirectional texture function*)



Linkes Bild: BTF Rechtes Bild: normale Textur

Aus: Mirko Sattler, Ralf Sarlette and Reinhard Klein: „Efficient and Realistic Visualization of Cloth“, Eurographics Symposium on Rendering 2003

Beispiel Video: Hase eingehüllt in Strick: <https://www.youtube.com/watch?v=Vu9eHbhzlwU>

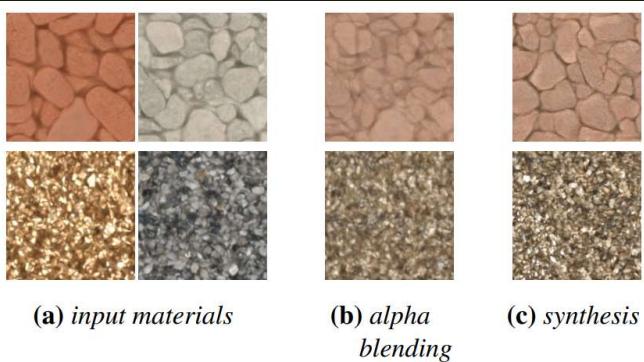


Figure 2: Comparison of 50% interpolation results with simple alpha blending (b) and our material synthesis approach (c). All figures show a cut-out of the BTF with light and view from directly above. The upper row shows that our approach aligns the features of the input materials and creates a meaningful interpolation result. Even in the second case, which does not exhibit such clear features, our synthesis approach creates a much sharper result.



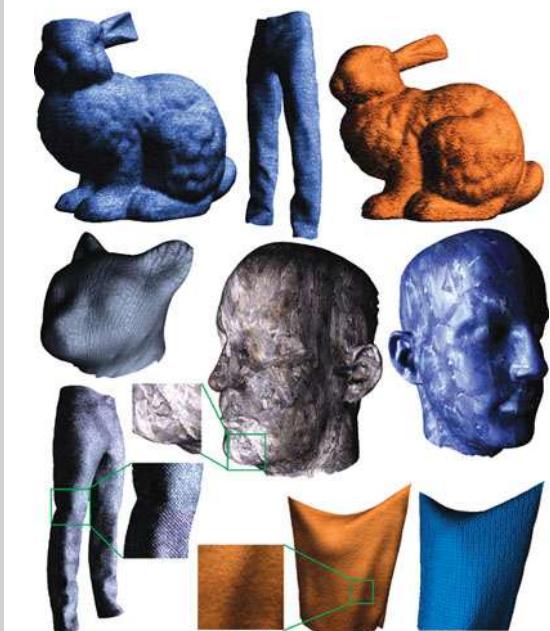
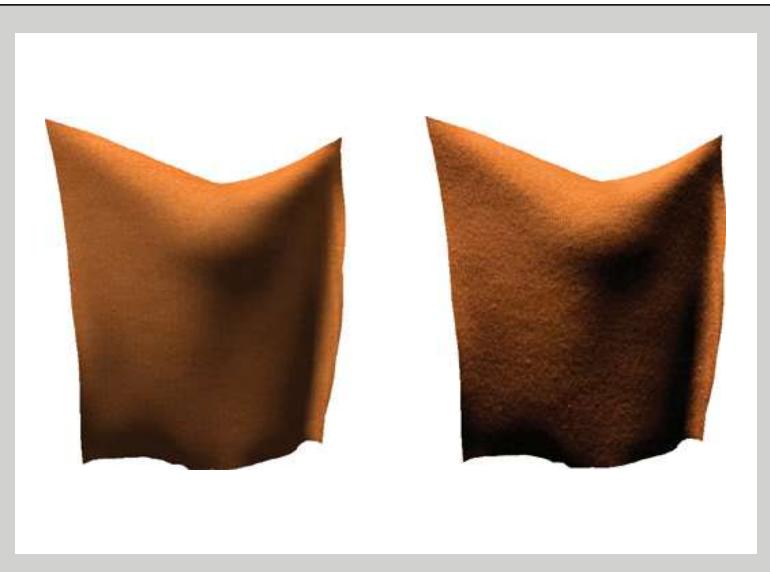
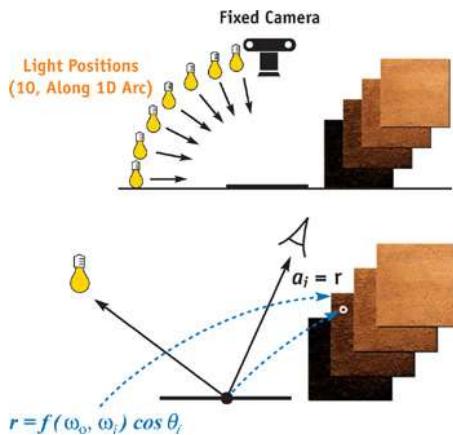
BTF (*bidirectional texture function*)

Bilder aus: <https://cg.cs.uni-bonn.de/en/publications/paper-details/ruiters-2013-btfinterpolation/>

Zugehöriges Paper: “Example-based Interpolation and Synthesis of Bidirectional Texture Functions” von Roland Ruiters, Christopher Schwartz und Reinhard Klein

(<https://cg.cs.uni-bonn.de/aigaion2root/attachments/eg2013-btf-interpolation.pdf>)

Weitere Paper: <https://cg.cs.uni-bonn.de/de/projekte/btfdbb/>



Wie berechnet man das ?

- GPU Gems 2 Chapter 11. "Approximate Bidirectional Texture Functions" von Jan Kautz, Massachusetts Institute of Technology
- Bilder und Anleitung:
<https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems2/part-ii-shading-lighting-and-shadows/chapter-11-approximate-bidirectional-texture>

2004



Welche Aussage passt nicht zur BTF?

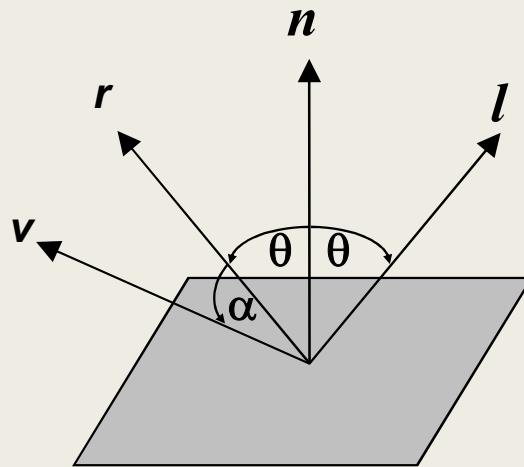
- a. eignet sich zur Visualisierung von Stoffen und Leder
- b. kann durch ein Gonioreflektor erstellt werden
- c. Kann zur Rekonstruktion der Textur eines eingescannten Objekts aus einem Material (Bsp. Keltenfürst aus Sandstein), welches in unterschiedlich beleuchteten Szenen integriert werden soll, genutzt werden
- d. alle passen

Bild aus: <https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/keltische-grabfunde-vom-glauberg-sind-national-wertvolle-kulturgueter-1976/>

Wie ermittelt man die „Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion“ BRDF?

- Per Genioreflektor (speichern als „Look Up Tables“) ✓
- Mittels Texturinformation (BTF) ✓
- Analytisch
 - Also: mathematische Beschreibung der Funktion
 - Beispiel: Reflexionsmodell von Cook und Torrance

Berechnung der spiegelnden Reflexion



n = Normale

l = Richtungsvektor einfallendes Licht

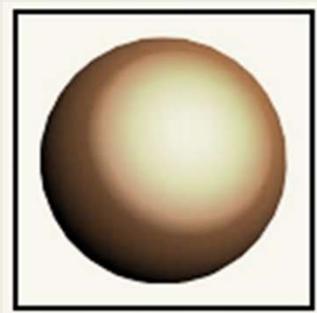
r = Richtungsvektor reflektiertes Licht

v = Richtungsvektor zum Betrachter

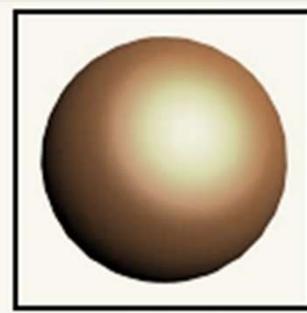
I_{spec} = spiegelnd reflektierende Lichtintensität

$$I_{spec} = I_e \cdot \cos(\alpha) \text{ bzw.}$$

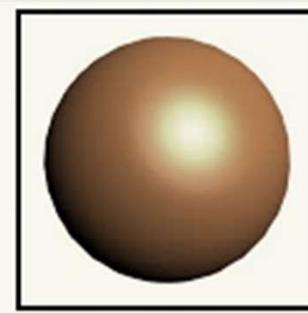
$$I_{spec} = I_e(r \cdot v)$$



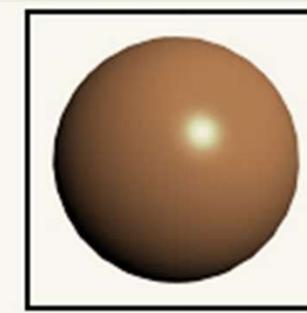
$n = 1$



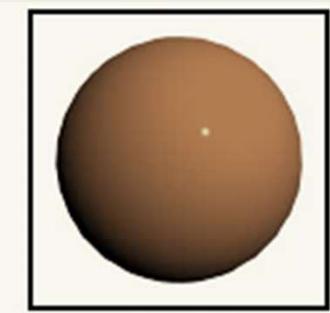
$n = 10$



$n = 25$



$n = 50$

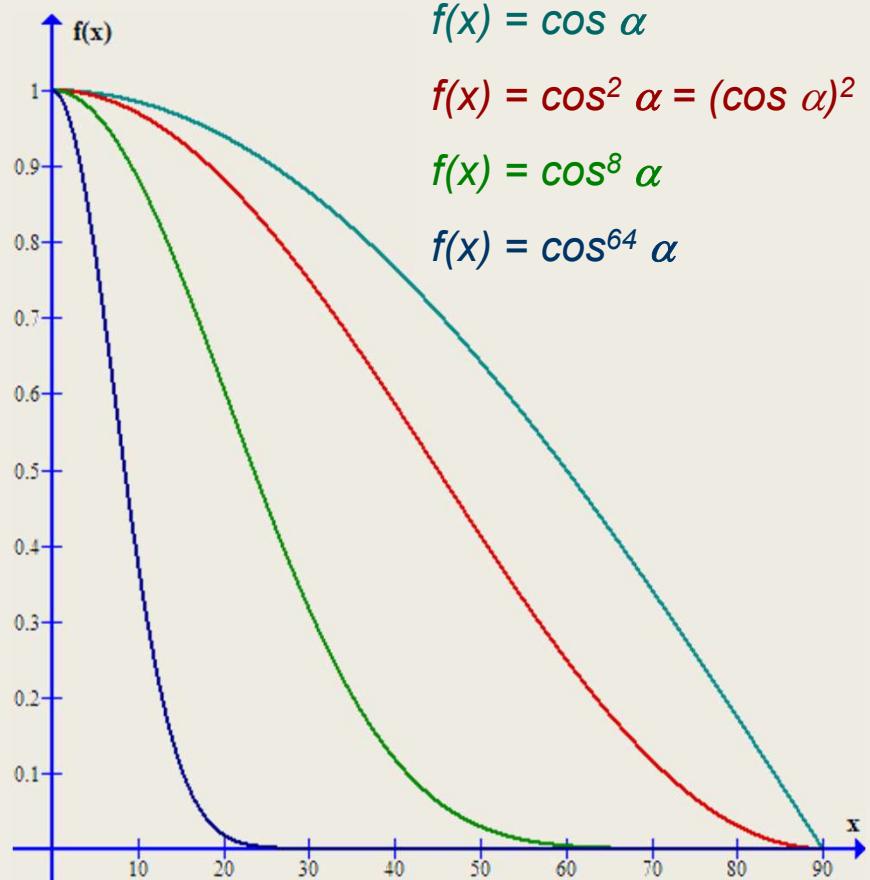


$n = 100$

Mit n kann man die Glanzpunkte (Highlights) unterschiedlich stark zu begrenzen

$$I_{\text{spec}} = I_e \cdot \cos(\alpha)^n$$

$$I_{\text{spec}} = I_e (r \cdot v)^n$$



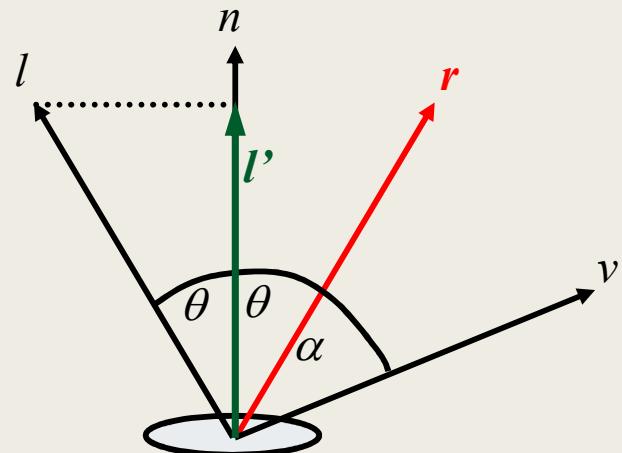
DIE AUSDEHNUNG DER
SPIEGELNDEN REFLEXION
(GLANZLICHT) ALS FUNKTION
DARGESTELLT

$$I_{spec} = I_e \cdot \cos(\alpha)^n \text{ bzw.}$$

$$I_{spec} = I_e (r \cdot v)^n$$

Berechnung des Reflexionsvektors r

1. Schritt: Berechnung von l'



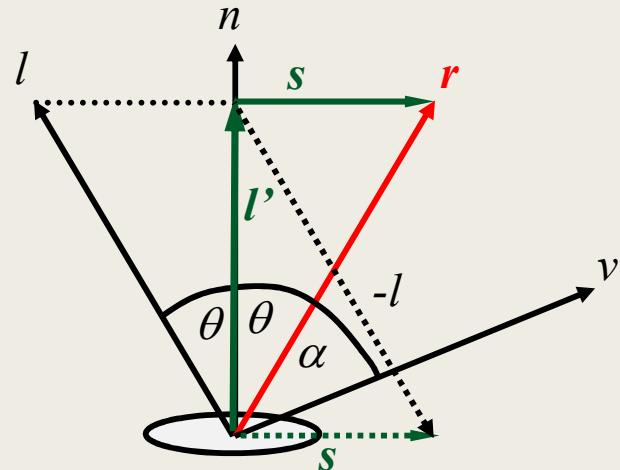
$$\text{Idee: } r = l' + s$$

$$l' = n * \cos(\theta) = n (n * l)$$

*Skalarprodukt kann nur verwendet werden,
weil l und n normiert sind.*

Berechnung des Reflexionsvektors r

2. Schritt: Berechnung von l'



$$\text{Idee: } r = l' + s$$

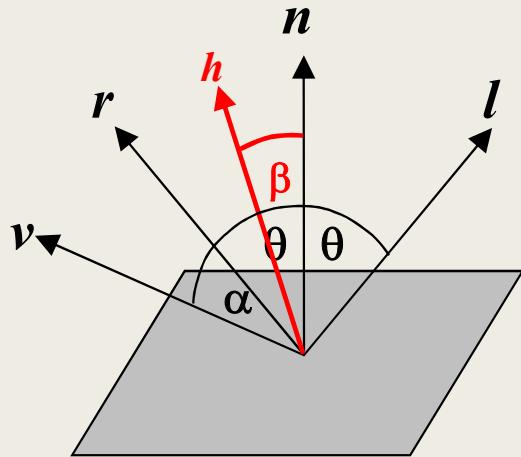
$$r = n \cdot \cos \theta + s$$

$$\text{da } s = l' - l$$

$$\text{S & l eingesetzt: } r = l' + s = l' + l' - l$$

$$r = 2 \cdot (n \cdot \cos \theta) - l \quad \longleftrightarrow \quad r = 2n \cdot (n \cdot l) - l$$

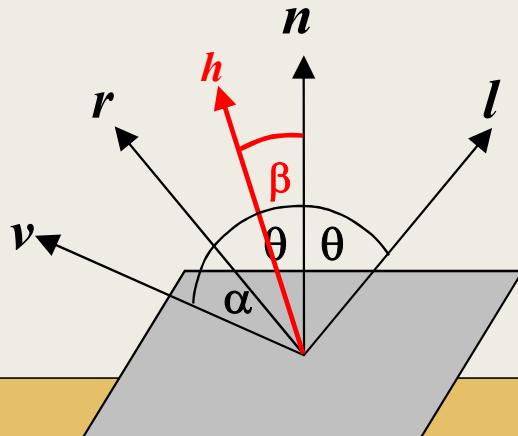
Alternative Formulierung der spiegelnden Reflexion: „half way“ Vektor



- Liegt auf der Hälfte des Winkels zwischen v und l
- Die Winkel α und β sind nicht gleich
- berechneten Schattierungen sind daher auch nicht gleich

$$\cos^n \beta = (n \cdot h)^n = \left(n \cdot \left(\frac{l + v}{|l + v|} \right) \right)^n$$

Alternative Formulierung der spiegelnden Reflexion: „half way“ Vektor

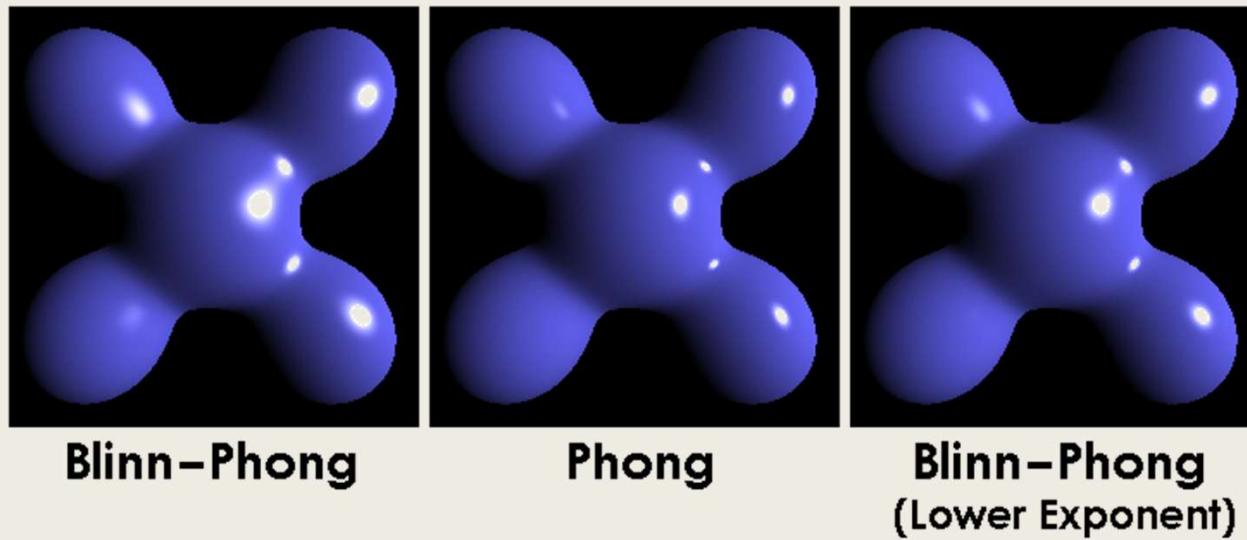


Das ist kein physikalisches Modell sondern ein empirisches. Phong ist auch nicht physikalisch korrekt!

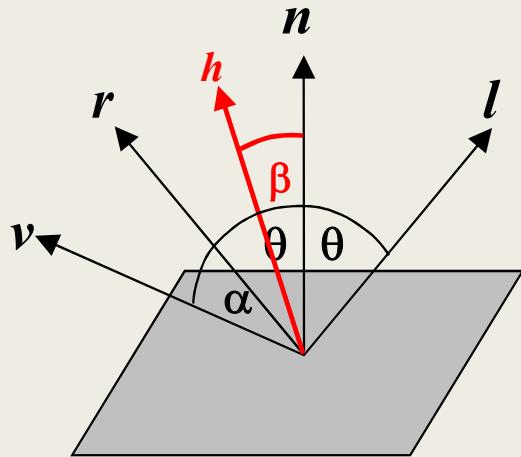
$$\cos^n \beta = (n \cdot h)^n = \left(n \cdot \left(\frac{l + v}{|l + v|} \right) \right)^n$$

$$\cos^n \alpha = (r \cdot v)^n = (2n \cdot (n \cdot l) - l \cdot v)^n$$

Alternative Formulierung der spiegelnden Reflexion: „half way“ Vektor



Alternative Formulierung der spiegelnden Reflexion: „half way“ Vektor



- h = „half way“ Vektor
- Liegt auf der Hälfte des Winkels zwischen v und l
- Umformulierung von $\cos(\alpha)$

$$I_{\text{spec}} = I_e \cdot \cos(\alpha)^n \text{ nach Phong}$$

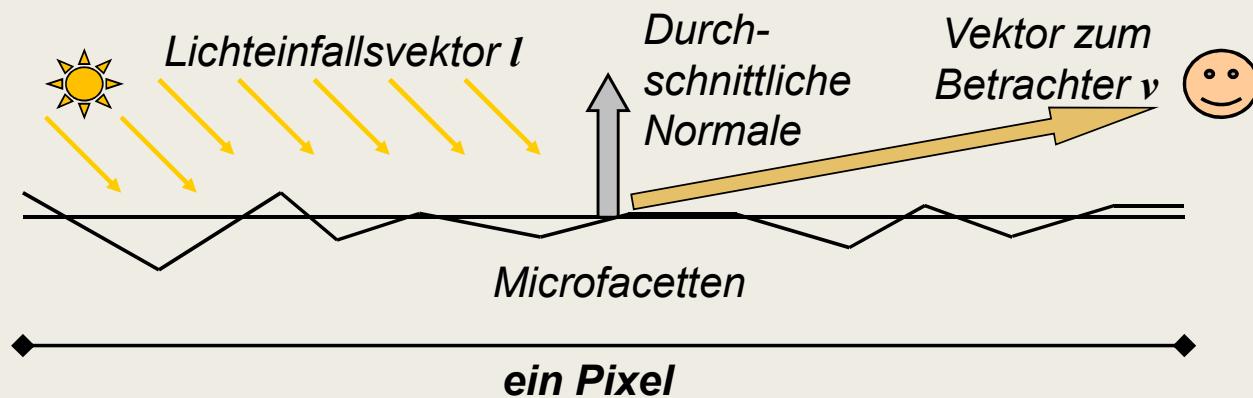
$$I_{\text{spec}} = I_e \cdot \cos(\beta)^n \text{ alternative Formulierung}$$

Reflexionsmodell von Cook und Torrance 1981

Analytische Beschreibung der spiegelnden Reflexion

Modellidee:

- Lichtstrahl wird an einer aus Microfacetten bestehenden Oberfläche reflektiert.
- Streuung der spiegelnden Reflexion entsteht durch die unterschiedliche Orientierung der Microfacetten.

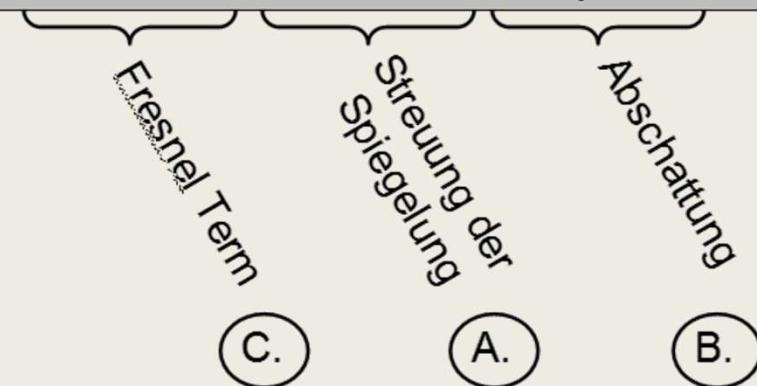


Reflexionsmodell von Cook und Torrance

$$I_{\text{ges}} = [I_a \cdot k_a +] I_e \cdot k_d \cdot (n \cdot l) + I_e \cdot r_s(n, l, v, m, \eta_1, \eta_2)$$

$$\text{mit } r_s(n, l, v, m, \eta_1, \eta_2) = \frac{F\left(\beta, \frac{\eta_1}{\eta_2}\right)}{\pi} \cdot D(\beta, m) \cdot \frac{G(n, l, v, h)}{\beta}$$

h = half way vektor





Realistic, Real-Time Rendering of Ocean Waves

Yaohua Hu^{*}
Microsoft Research

Luiz Velho[†]
IMPA

Xin Tong[‡]
Microsoft Research

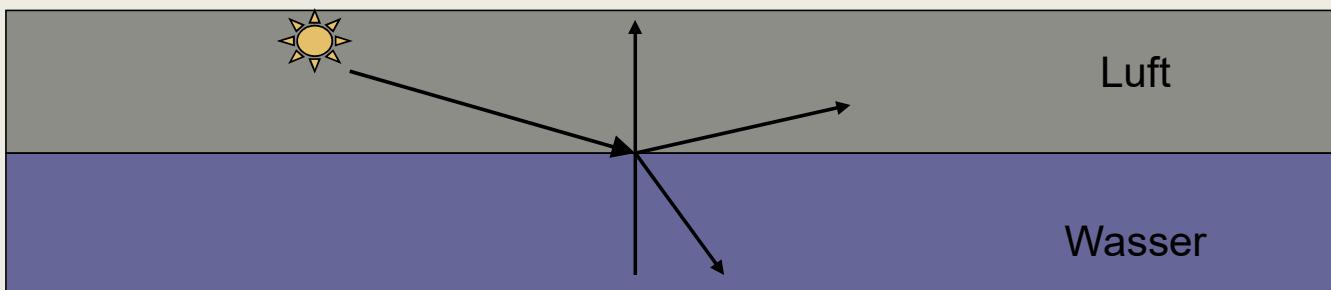
Baining Guo[§]
Microsoft Research

Harry Shum[¶]
Microsoft Research

FRESNEL-EFFEKT

Lichtbrechung (specular refraction)

- Lichtstrahl trifft auf die Grenzfläche zweier verschiedener Medien (etwa Luft und Wasser)
- Teil der Lichtenergie wird reflektiert und der andere Teil geht durch die Grenzfläche in das zweite Medium über
- dabei ändert sich die Ausbreitungsrichtung des Strahls
- Die Fresnel-Formel gibt nun das Verhältnis von der reflektierenden und transmittierenden im Verhältnis zur einfallenden Strahlung an.

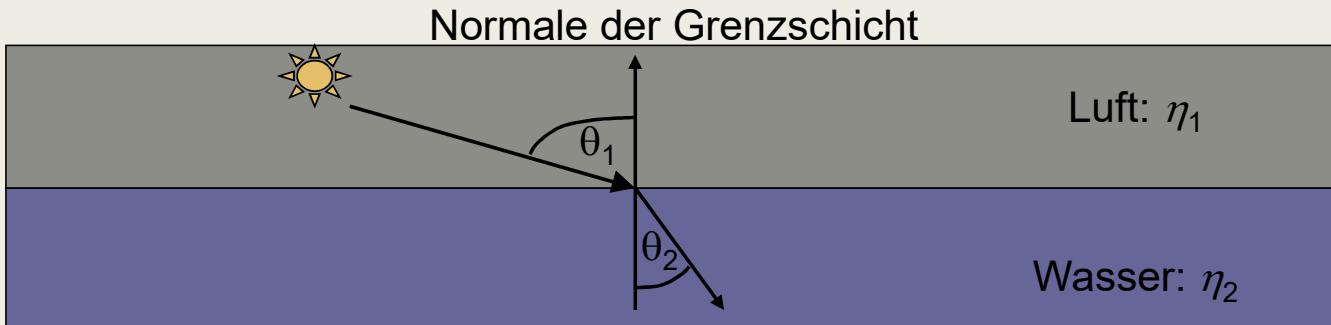


Lichtbrechung (specular refraction)

Das Brechungsgesetz wurde 1621 auf experimentellen Weg von holländischen Physiker Willebrod Snellius entdeckt.

Gesetz von Snellius [5]:

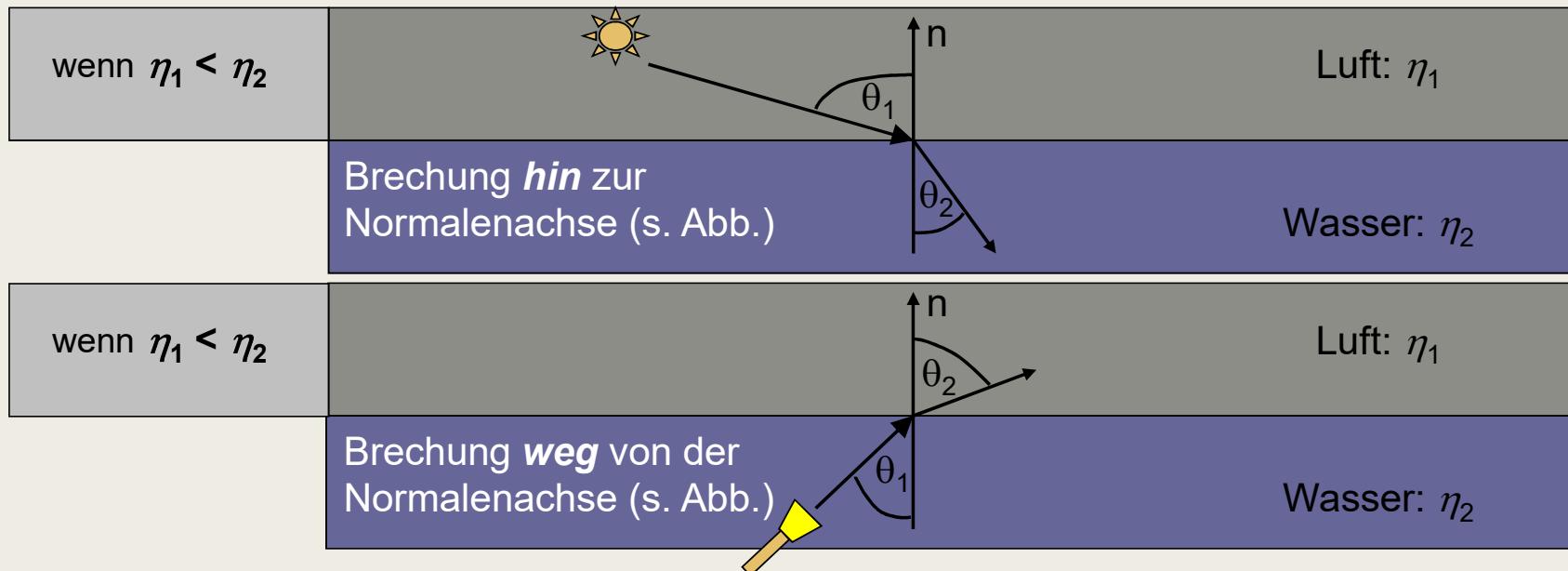
$$\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2 \quad \text{mit } \eta_1, \eta_2 = \text{Brechungszahl}$$



Lichtbrechung (specular refraction)

Gesetz von Snellius [5]:

$$\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2 \quad \text{mit } \eta_1, \eta_2 = \text{Brechungszahl}$$



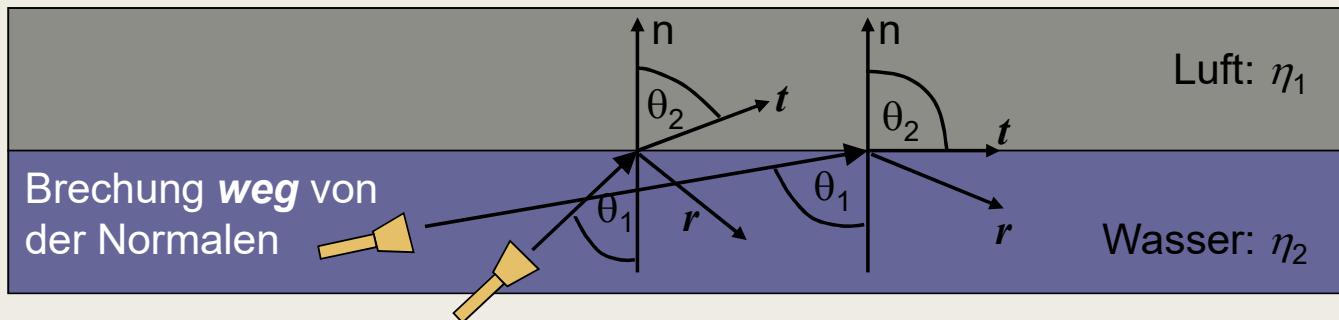
Lichtbrechung (specular refraction)

Einige Brechzahlen:

Medium	Brechzahl
Vakuum	1,0
Luft	1,00029
Eis	1,31
Wasser (20° C)	1,33
Glass	1,5 – 1,6
Saphir	1,77
Diamant	2,42

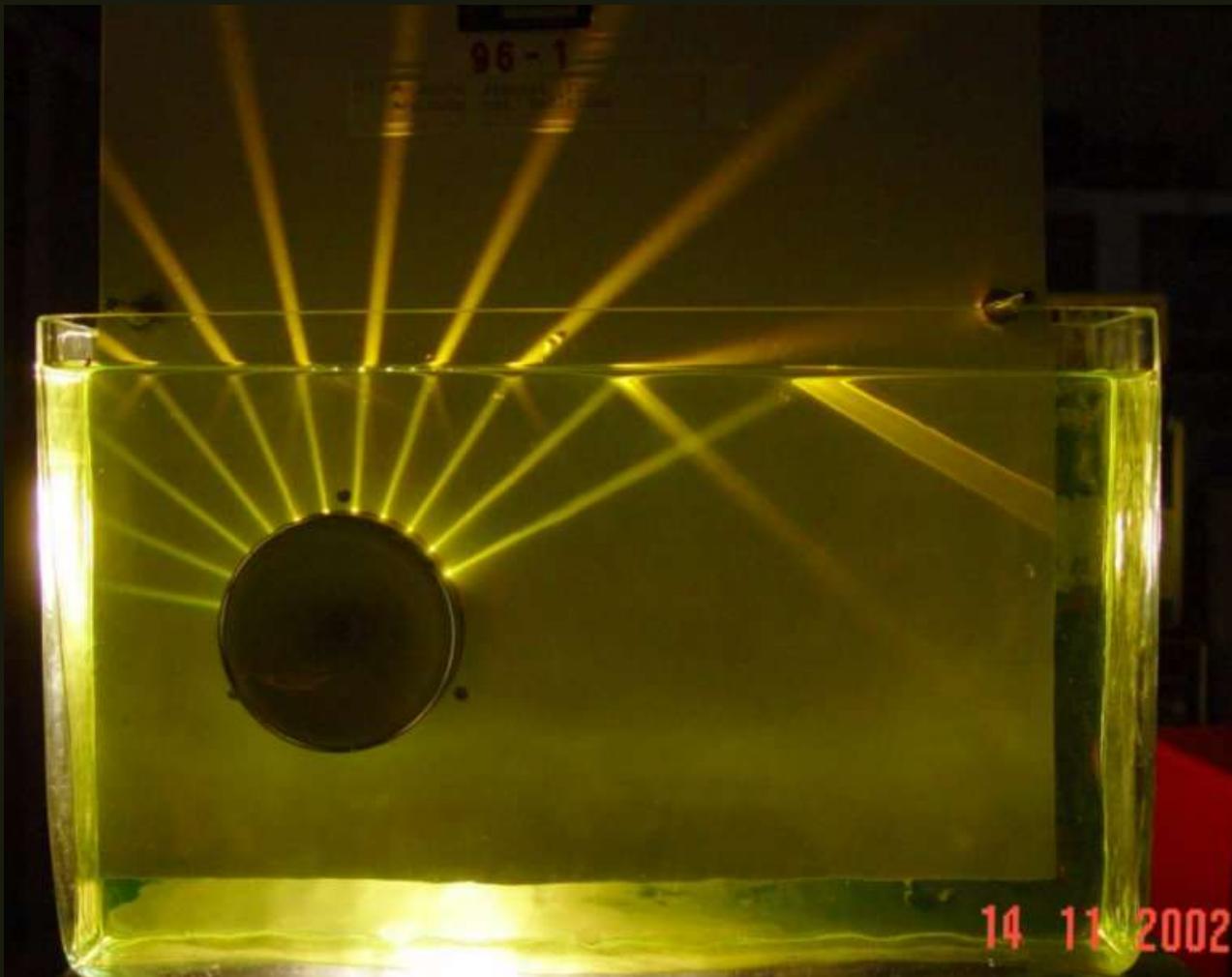
Lichtbrechung (specular refraction)

- Beim Übergang vom dichteren ins optisch dünnere Medium wird ein (kleiner) Teil des Lichtstrahles zurück ins dichtere Medium reflektiert.
- Wenn θ_2 größer gleich 90° ist, wird der Lichtstrahl nicht mehr gebrochen sondern total reflektiert.



- Dieses Phänomen tritt zum ersten Mal auf, wenn θ_2 genau 45° hat.
- Je nach Medium hat der Winkel θ_1 dann einen bestimmten Größe:
Diesen Winkel nennt man Brewster Winkel:

Für den Brewster Winkel θ_b gilt: $\eta_1 \sin \theta_b = \eta_2 \sin \pi/2$



Lichtbrechung (specular refraction)

Totalreflexion aus:

http://vorsam.uni-ulm.de/ASP/OArchiv_Images.asp?OrdnungsNr=0%2D068

Ergebnisbilder von Cook und Torrance 1981 [6]:



Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>

METAL SHADER WORKFLOW

STEP 1
BASE SHADER
Standard material shader with default settings.

STEP 2
ESTABLISHING BASE VALUES
Here we are setting up the standard shader to follow a more physically accurate approach, providing base values to work from.

STEP 3
ADJUSTING IOR / FRESNEL
Although more subtle in appearance for metals, IOR and fresnel are needed to give different metals the unique look that each one has.

STEP 4
ADDING DETAIL
The most crucial step and what separates a CG looking material from one that is more believable. Use grunge maps to breakup and add detail to spec and roughness channels.

STEP 5
ALTERING SURFACE QUALITY
This is optional depending on what kind of surface look you are wanting. You could stop after step 4 if that is your desired result. Here the grunge map has also been added to the bump channel.



DIFFUSE COLOR:	255 / 255 / 255	DIFFUSE COLOR:	0 / 0 / 0	DIFFUSE COLOR:	0 / 0 / 0	DIFFUSE COLOR:	0 / 0 / 0	DIFFUSE COLOR:	0 / 0 / 0		
DIFFUSE AMOUNT:	70% [0.7]	DIFFUSE AMOUNT:	0% [0]	DIFFUSE AMOUNT:	0% [0]	SPEC COLOR:	165 / 165 / 165	SPEC COLOR:	165 / 165 / 165	SPEC COLOR:	Map + 165 / 165 / 165
SPEC COLOR:	255 / 255 / 255	SPEC COLOR:	165 / 165 / 165	SPEC COLOR:	165 / 165 / 165	SPEC AMOUNT:	30% [0.3]	SPEC AMOUNT:	100% [1.0]	SPEC AMOUNT:	100% [1.0]
SPEC AMOUNT:	30% [0.3]	SPEC AMOUNT:	100% [1.0]	SPEC AMOUNT:	100% [1.0]	ROUGHNESS:	46% [0.46]	ROUGHNESS:	38% [0.38]	ROUGHNESS:	38% [0.38]
ROUGHNESS:	46% [0.46]	ROUGHNESS:	38% [0.38]	ROUGHNESS:	38% [0.38]	FRESNEL:	No	FRESNEL:	No	FRESNEL:	Yes
FRESNEL:	No	FRESNEL:	No	FRESNEL:	No	IOR:	N/A	IOR:	2.0	IOR:	2.0

A small sample of the grunge map used. Avoid having 'flat' maps for your shaders. *Inconsistency is key to believability.*

Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>



Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>



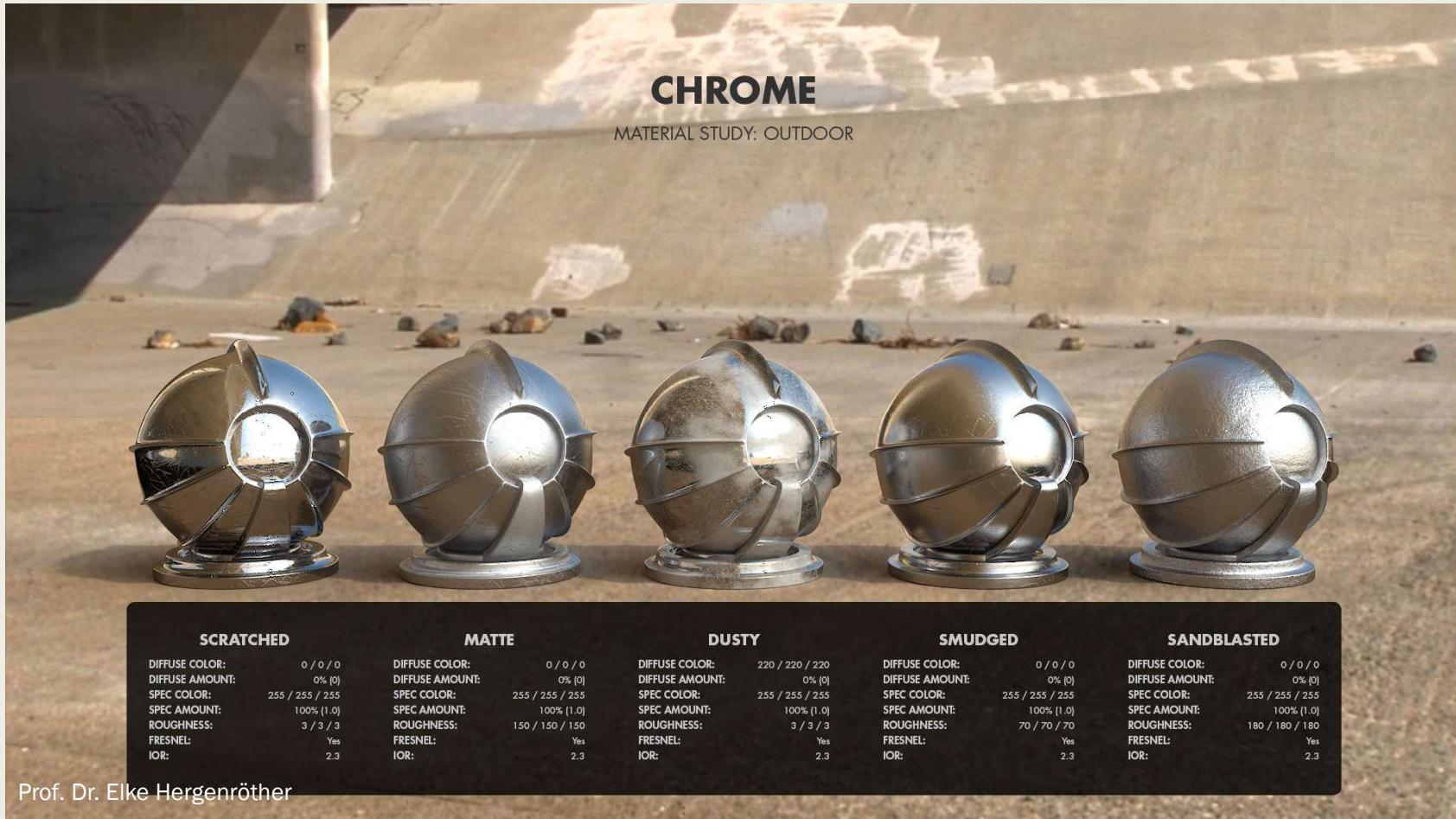
Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>



Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>



Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>

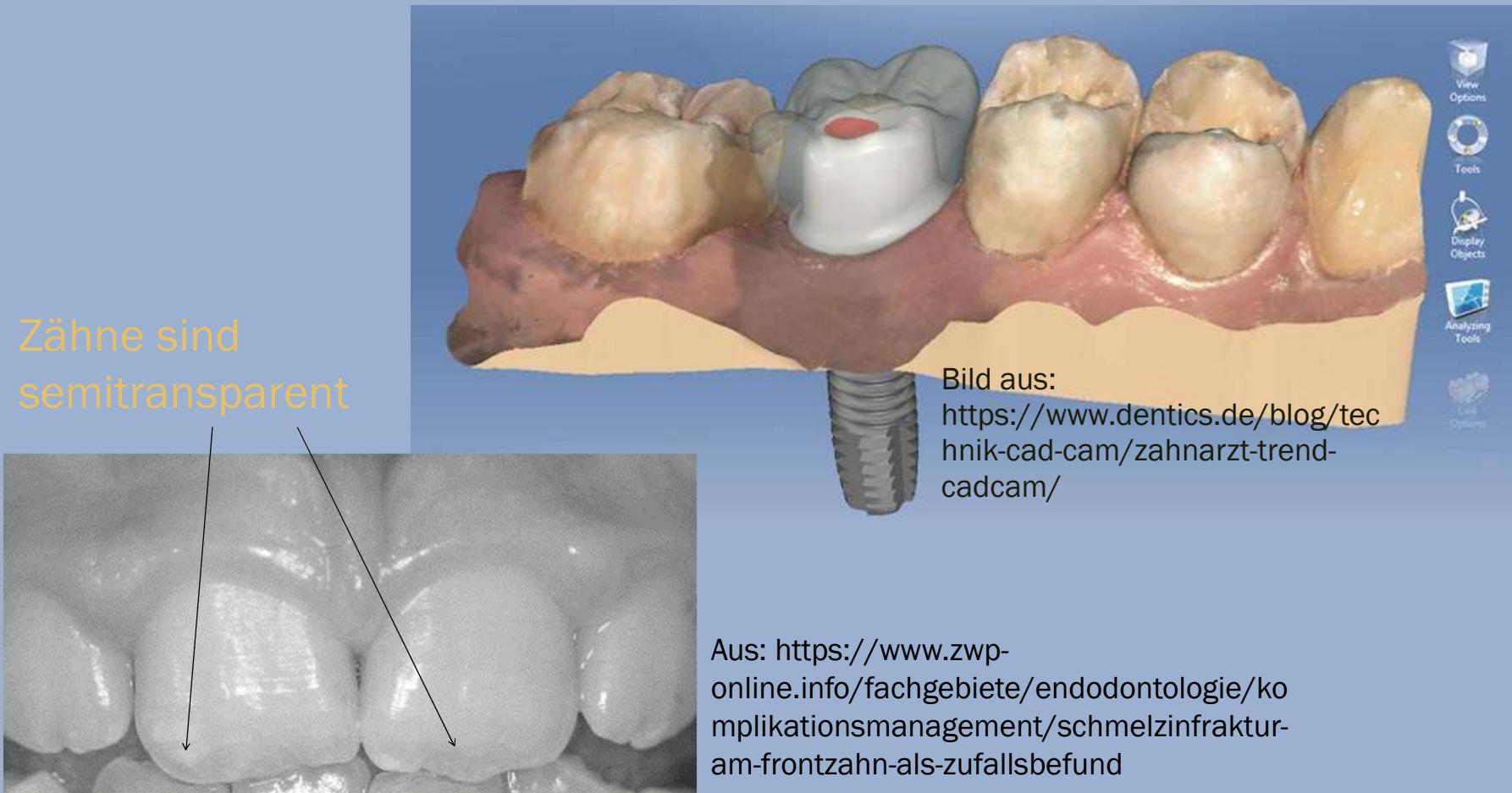


Analytische Berechnung von Metall in Houdini® von Jarrod Hasenjager

<https://www.behance.net/gallery/35636521/Material-Studies-Metals>



Eignet sich eine BRDF zur Visualisierung von Zähnen?

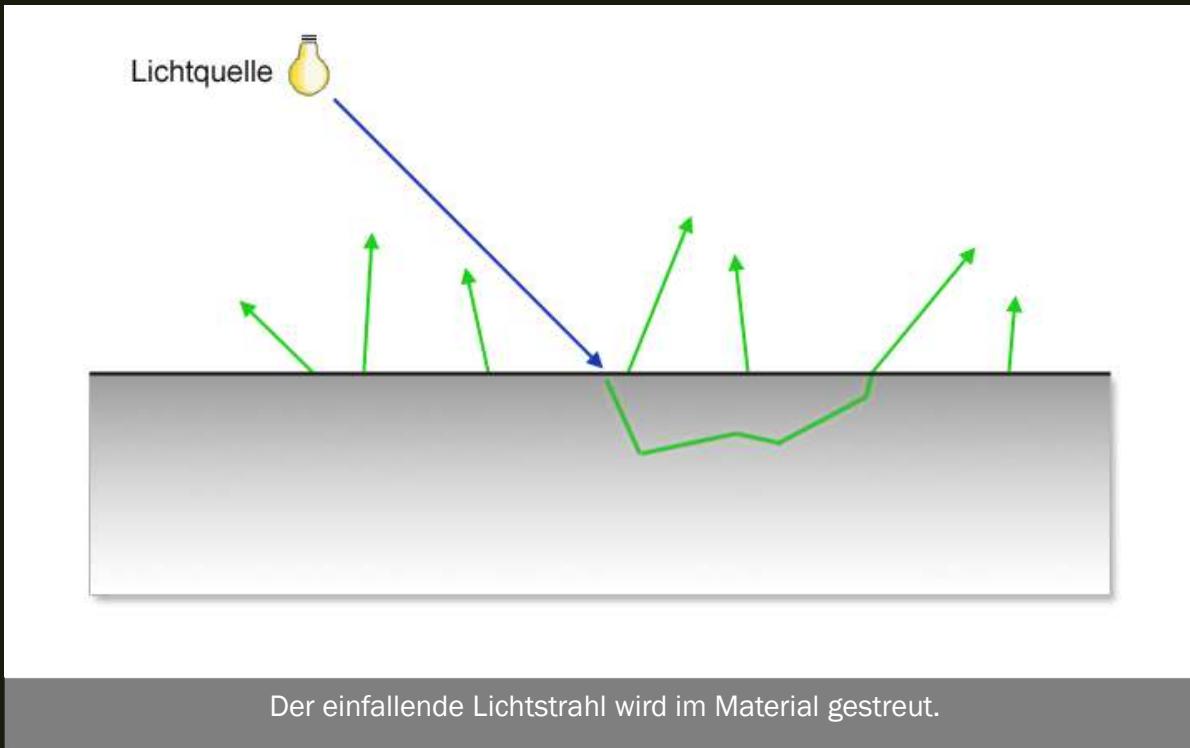


BSSRDF

(Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function)

Im Gegensatz zur BRDF ist bei der BSSRDF der Auftreffpunkt des Lichtes und der Ausgangspunkt der Reflexion *nicht* identisch!

Beispielmaterialien: Marmor, Haut



Modeling and Rendering of Translucent Materials

Investigators: [Michael Goesele](#), [Hendrik P. A. Lensch](#), [Jochen Lang](#), [Christian Fuchs](#),
and [Tongbo Chen](#)

Photographien



Pferd aus
Alabaster



Gerendert



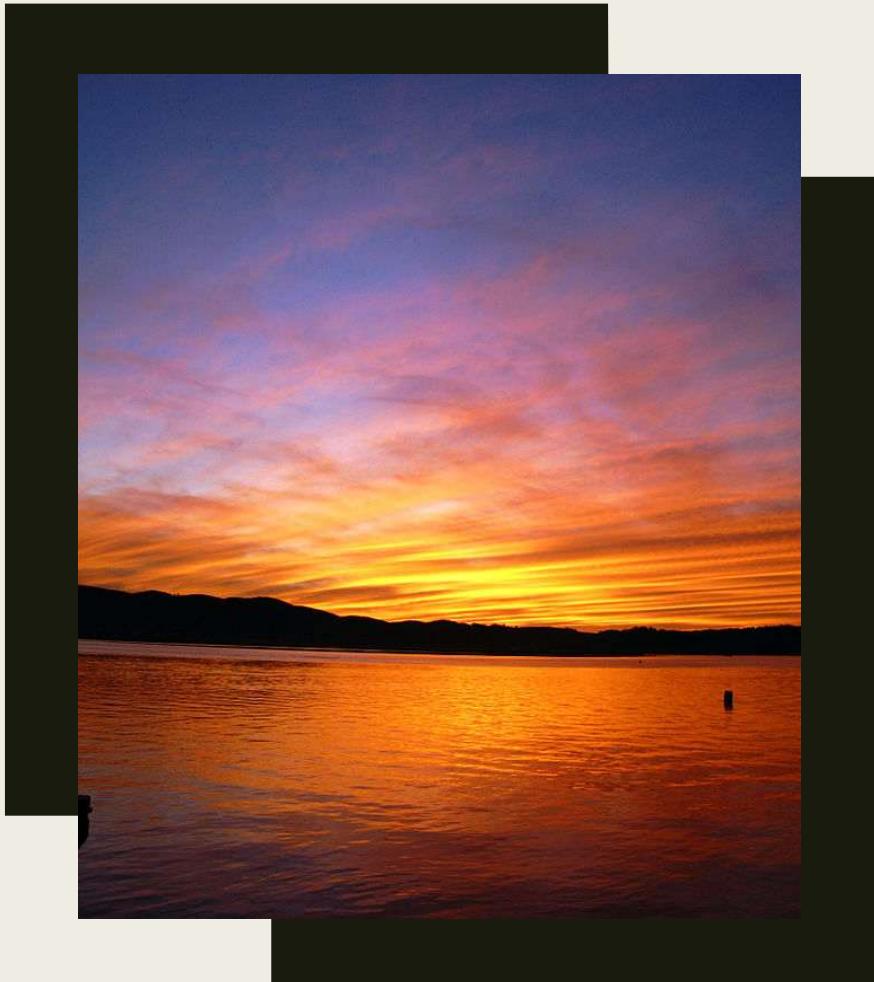
Beispiele für BSSRDF

Beispiele für BSRRDF



**Jeppe Revall Frisvad
Niels Jørgen Christensen
Technical University of Denmark**

**Henrik Wann Jensen
University of California, San Diego**



EIGENTLICH KOMMT DIE LORENZ-MIE-STREUUNG BEI DER BERECHNUNG DER HIMMELSFÄRBUNG ZUR ANWENDUNG:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a6/Knysnasunset.jpg/640px-Knysnasunset.jpg>

Literatur:

1. M. Pharr, G. Humpherys: „*Physically Based Rendering*“, Morgan Kaufmann Verlag, 2004
2. J. Foley, A. van Dam, St. Feiner and J. Hughes: „*Computer Graphics: Principles and Practice*“, 2nd Ed., Addison-Wesley, 1990
3. P. Dutre, K. Bala, P. Bekaert: „*Advanced Global Illumination*“, 2nd Ed., A K Peters, 2006
4. H. W. Jensen: „*Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*“, A K Peters, 2001
5. P. Tipler: „*Physik*“, Spektrum Akademischer Verlag, 1998
6. R. L. Cook and K. E. Torrance „*A Reflectance Model for Computer Graphics*“, 1981