

Computer Graphik I

Beleuchtung

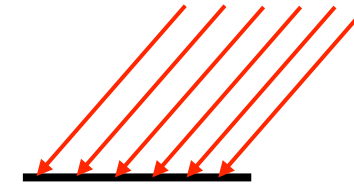
- Anwendung
- Geometrieverarbeitung
 - Perspektivische Transformation, kanonisches Sichtvolumen
 - Clipping
 - Culling (Verdeckungsrechnung im Objektraum)
 - Simulation der Beleuchtung
 - Projektion
- Rasterisierung
- Ausgabe

- Beleuchtungsmodell
 - Vorschrift zur Berechnung der Farb- oder Grauwerte in der Szene
 - Modelliert werden die Einflüsse
 - der Lichtquellen (Lage, Größe, Stärke, Spektrum) und
 - der Oberflächenbeschaffenheit (Geometrie, Reflexionseigenschaften) von Objekten.
 - Vorgang der Lichtausbreitung wird simuliert
 - Echtzeitanforderungen erfordern vereinfachte Modelle
 - Grundlage sind die Wahrnehmung des Menschen und die Gesetze der Physik

- Licht wird in der CG modelliert durch drei Bestimmungsgrößen (Graßmann Gesetze)
- Interaktion mit Objekt = Veränderung der drei Bestimmungsgrößen
 - Materialeigenschaften = Art dieser Veränderung bzw. Abhängigkeit von Umgebungsparametern
- Als Interaktionen lassen wir im Moment nur Reflexion zu

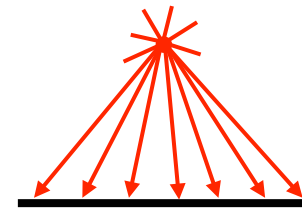
- Gerichtete/parallele Lichtquelle

- Punkt im Unendlichen: $(x,y,z,0)^T$



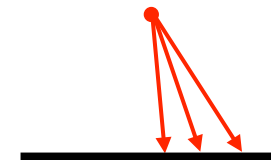
- Punktlichtquelle

- Endliche Position: $(x,y,z,1)^T$

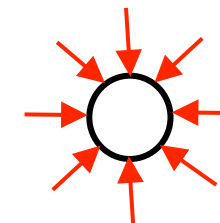


- Spot

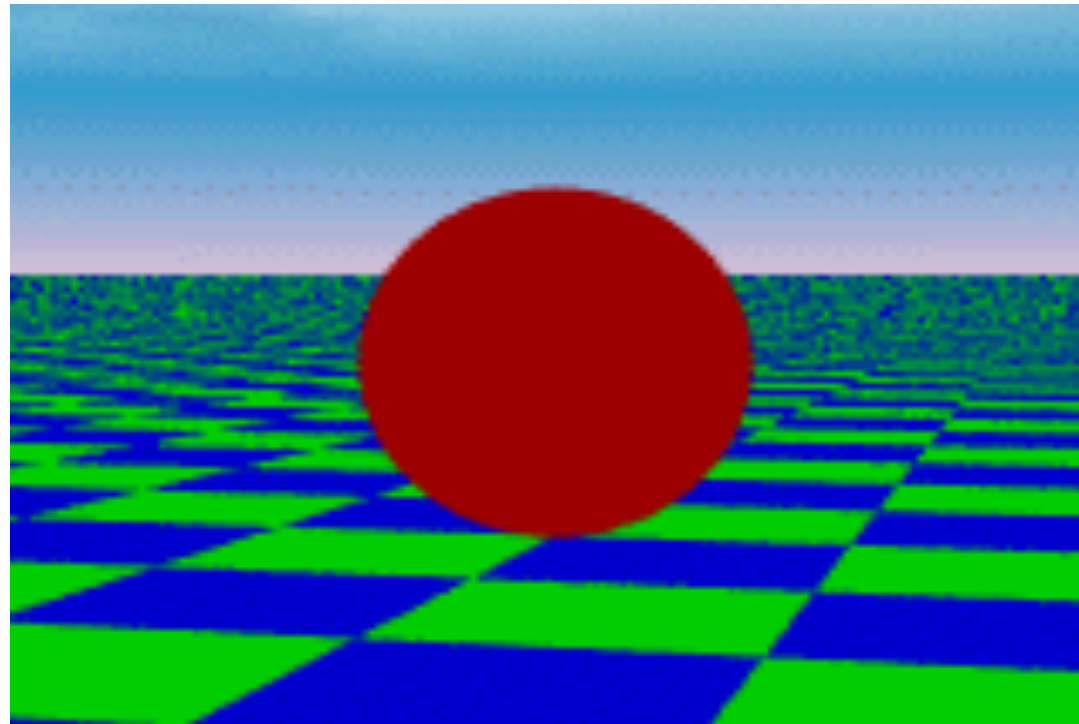
- Position, Richtung, Winkel



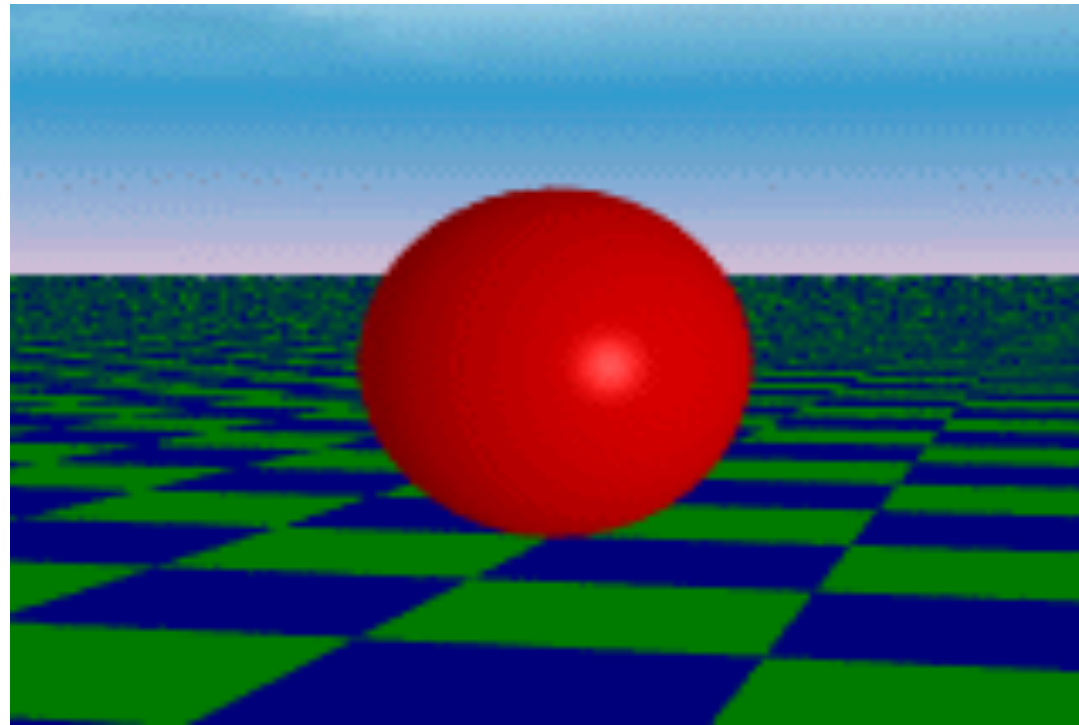
- Ambiente Lichtquelle



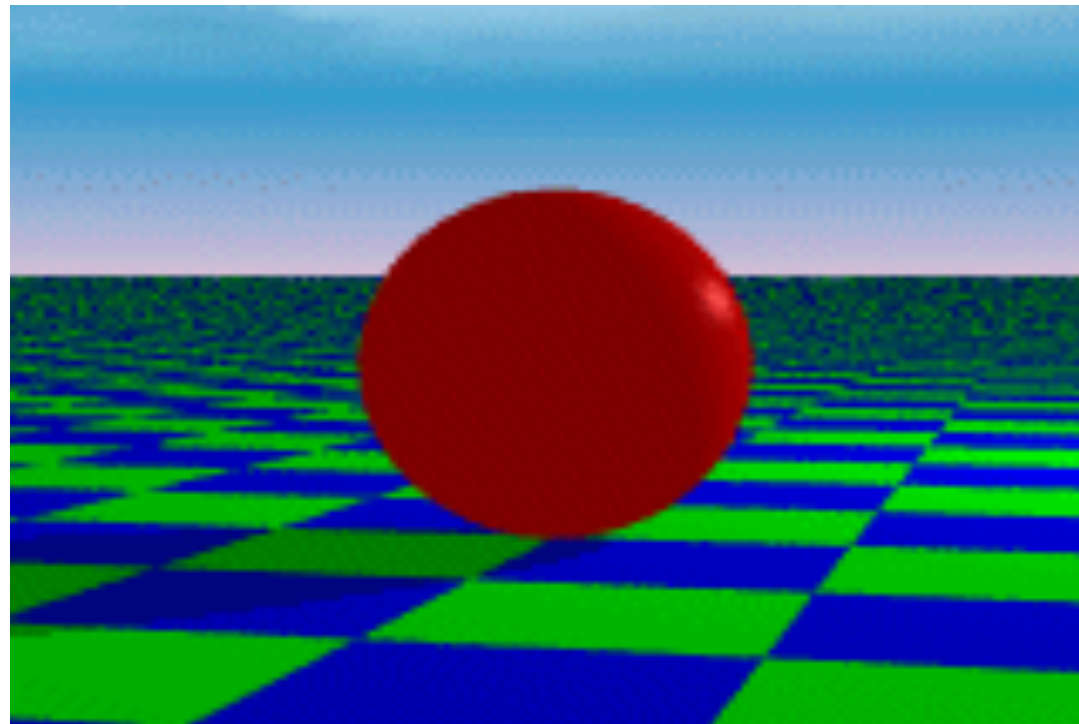
- Szene mit ambienter Lichtquelle



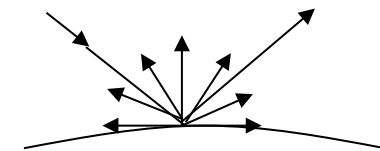
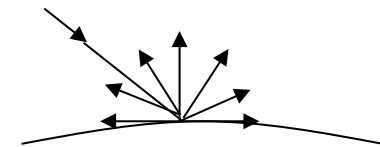
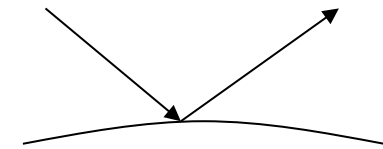
- Szene mit gerichtetem und ambientem Licht



- Szene mit Punktlichtquelle und ambientem Licht

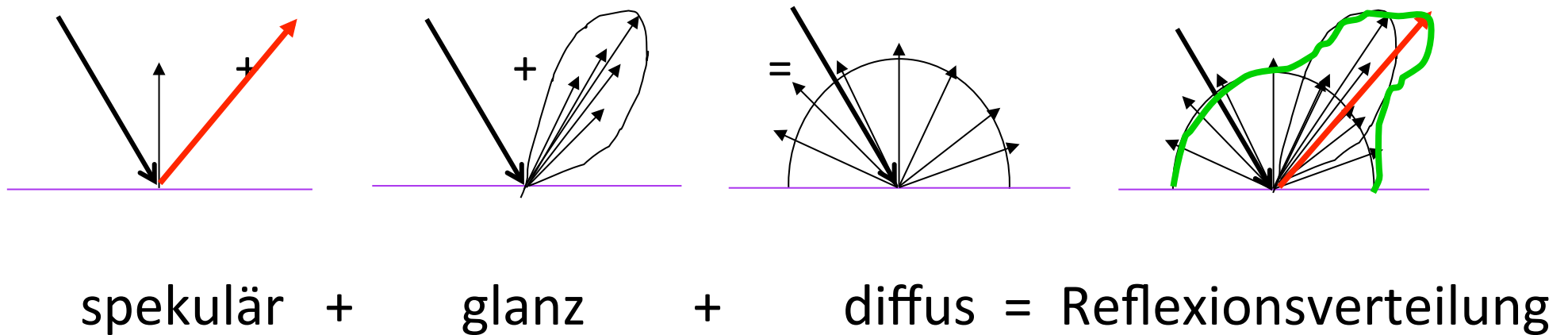


- *Spekulär* (a.k.a. *spiegelreflexion*) = Reflexion ohne Streuung.
- *Diffuse* Reflexion sendet Licht in alle Richtungen mit gleicher Energie aus.
- *Gemischte* Reflexion ist eine gewichtete Kombination von spekulär and diffus.



Reflexionsverteilungs Modell

- Viele Flächen = Komplexes Reflexionsverhalten
 - Variiert je nach Einfall- und Austrittswinkel des Lichts
 - Modell als Kombination

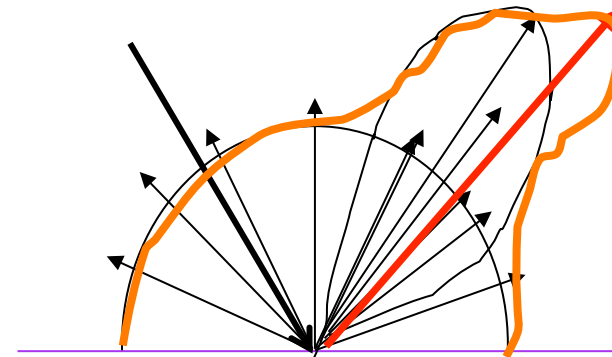


- In der CG nimmt die Intensität des Lichts im Raum nicht ab
- Licht wird entlang Strahlen verfolgt
- Geeignete Größe: Leistung pro Raumwinkel pro Fläche
 - Radiometrisch: Strahldichte
 - Photometrisch: Leuchtdichte (Candela pro Quadratmeter)
- Wenn etwas beleuchtet wird, ist der Raumwinkel meist irrelevant
 - Beleuchtungsstärke (Lux) = Leistung pro Fläche
- Andere (photometrische) Grundgrößen
 - Lichtstrom (Lumen) = Leistung
 - Lichtstärke (Candela) = Leistung pro Raumwinkel

- Beschreibung der Reflexion von Strahlung
- Spektraler Reflexionsfaktor
- Verhältnis von reflektierter Strahldichte L zur einfallenden Bestrahlungsstärke E

$$\rho(\lambda, \phi_r, \theta_r, \phi_i, \theta_i) = \frac{L_{\lambda,r}(\lambda, \phi_r, \theta_r)}{E_{\lambda,i}(\lambda, \phi_i, \theta_i)} = \frac{L_{\lambda,r}(\lambda, \phi_r, \theta_r)}{\int L_{\lambda,i}(\lambda, \phi_i, \theta_i) \cos(\theta_i) d\Omega_i}$$

- Einfallende Strahlung: Index i
- Reflektierte Strahlung: Index r
- BRDF = „bidirectional reflection distribution function“



1. Reziprozität

- ρ_λ ändert sich nicht, wenn Einfallswinkel und Ausfallswinkel vertauscht werden

2. ρ_λ ist im allgemeinen anisotrop

- Drehen der Fläche um die Normale ändert den Reflexionsfaktor
- Typische Beispiele sind Stoffe oder Metalleffektlacke.

3. Superposition

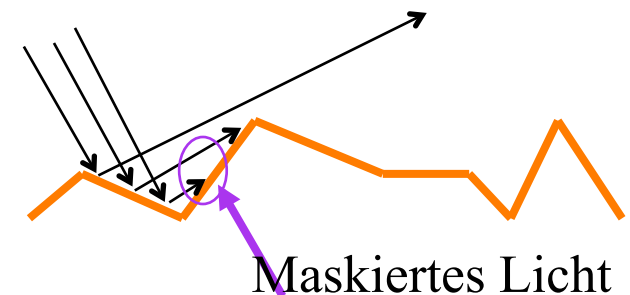
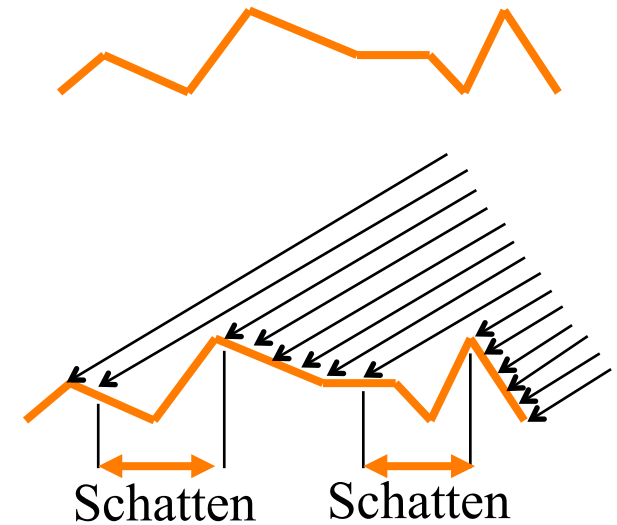
- Licht aus mehreren Richtungen kann linear überlagert werden
- Integration über alle Einfallrichtungen ergibt

$$L_{\lambda,r} = \int_{\Omega_i} \rho L_{\lambda,i} \cos(\theta_i) d\Omega_i$$

- Reflexionsfaktor ist wegen der Energieerhaltung immer positiv
- In der CG wird der Reflexionsgrad r verwendet
 - Gibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Beleuchtungsstärke an
 - Wird aber auf Leuchtdichten angewendet
 - Ist dimensionslos

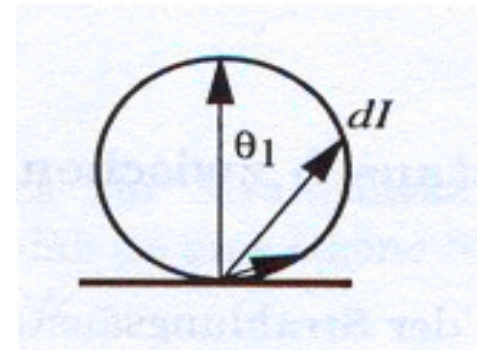
$$r_{\lambda} = \frac{E_{\lambda,r}}{E_{\lambda,i}}, \quad 0 \leq r_{\lambda} \leq 1$$

- Auf einer mikroskopischen Skala sind alle Flächen rauh
- Selbstverschattung
- “Maskierung” von reflektiertem Licht

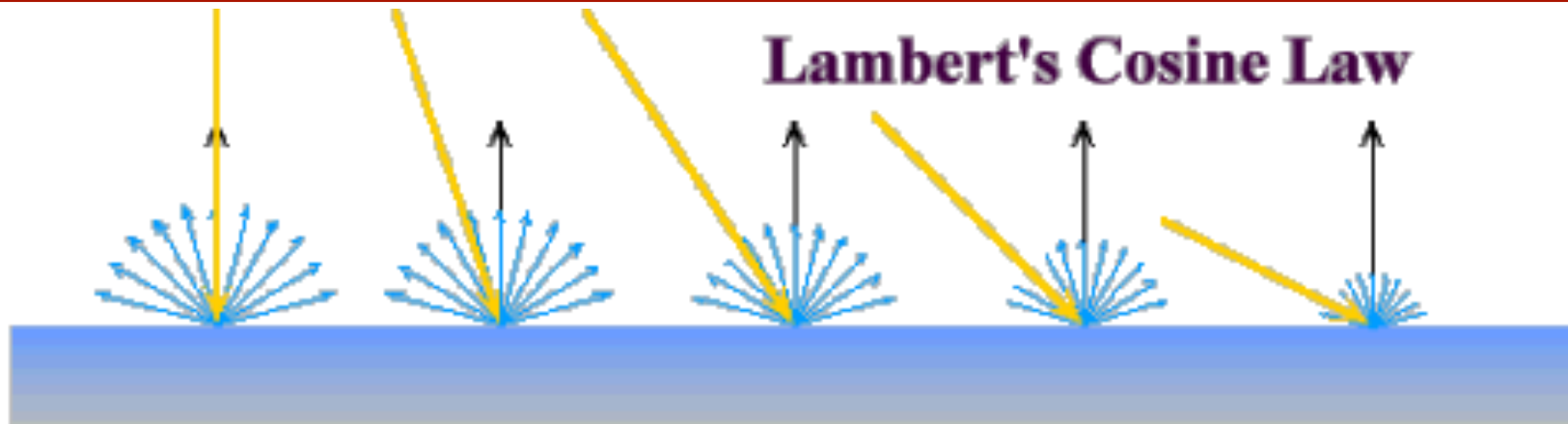


- Einfachster Fall: Reflektierte Leuchtdichte ist unabhängig von der Abstrahlungsrichtung
 - Lambert'sche Reflexion
- Allerdings hängt die Beleuchtung vom Einstrahlungswinkel θ zur Normalen ab
- Abhängigkeit ergibt sich aus der beleuchteten Fläche, die mit dem Kosinus des Winkels zur Normalen kleiner wird
 - Lambertsches Kosinusetz

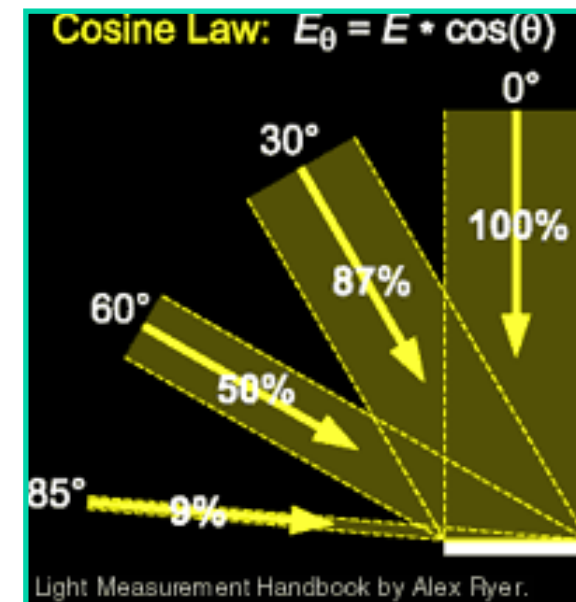
$$dI = LdA_1 \cos \theta_1$$



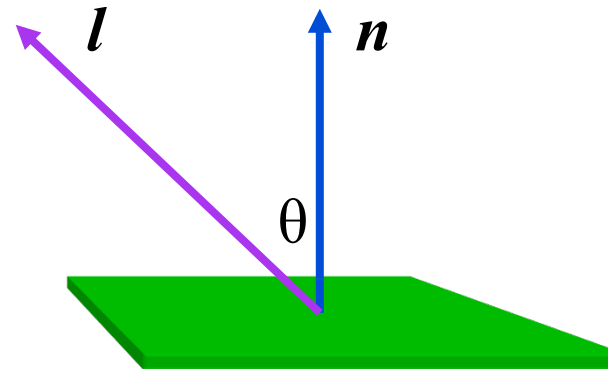
Lambertsches Kosinusetz



Intuitiv: Schnittfläche des “Strahlenbündels” welches eine Einheitsfläche schneidet. Diese Schnittfläche ist kleiner für grössere Winkel mit der Flächennormalen.



- Winkel zwischen Normale und einfallendem Licht ist *Inzidenzwinkel*:



$$I_{\text{diffus}} = k_d I_{\text{licht}} \cos \theta$$

k_d : diffuse Komponente

”Flächenfarbe”

- mit Vektorarithmetik

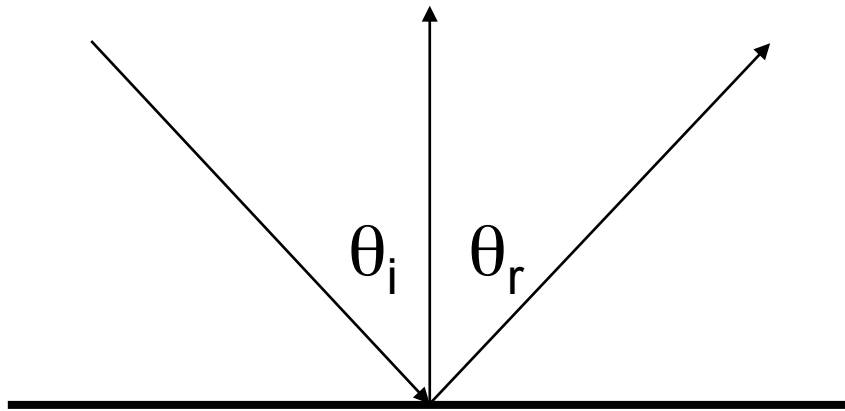
$$I_{\text{diffus}} = k_d I_{\text{licht}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})$$

- Spiegelnde Reflexion wird durch das Reflexionsgesetz beschrieben
 - Der einfallende und der reflektierte Strahl bilden mit der Normalen der reflektierenden Oberfläche gleiche Winkel
 - Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Flächennormale liegen in einer Ebene
- Es gilt
 - In Polarkoordinaten:

$$\theta_r = \theta_i \quad \text{und} \quad \phi_r = \phi_i + \pi$$

Ideal spiegelnde Reflexion

Geometrie des Reflektionsgesetzes

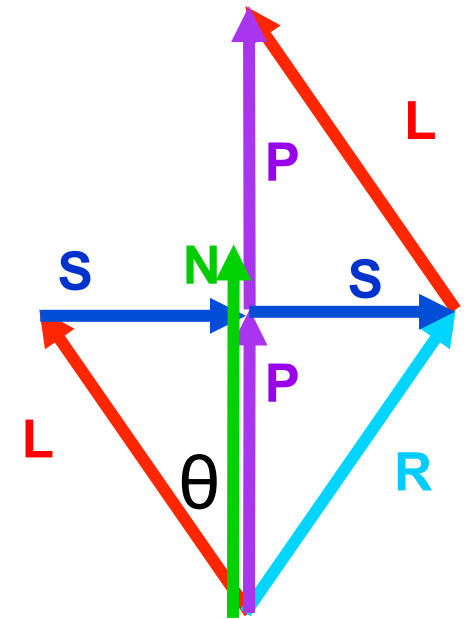


$$\mathbf{P} = \mathbf{N} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$

$$2 \mathbf{P} = \mathbf{R} + \mathbf{L}$$

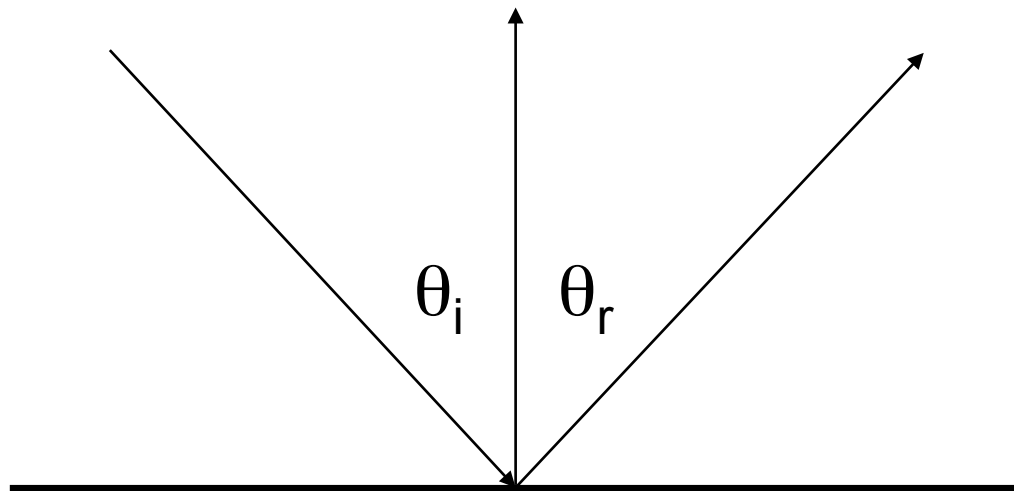
$$2 \mathbf{P} - \mathbf{L} = \mathbf{R}$$

$$2 (\mathbf{N} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})) - \mathbf{L} = \mathbf{R}$$

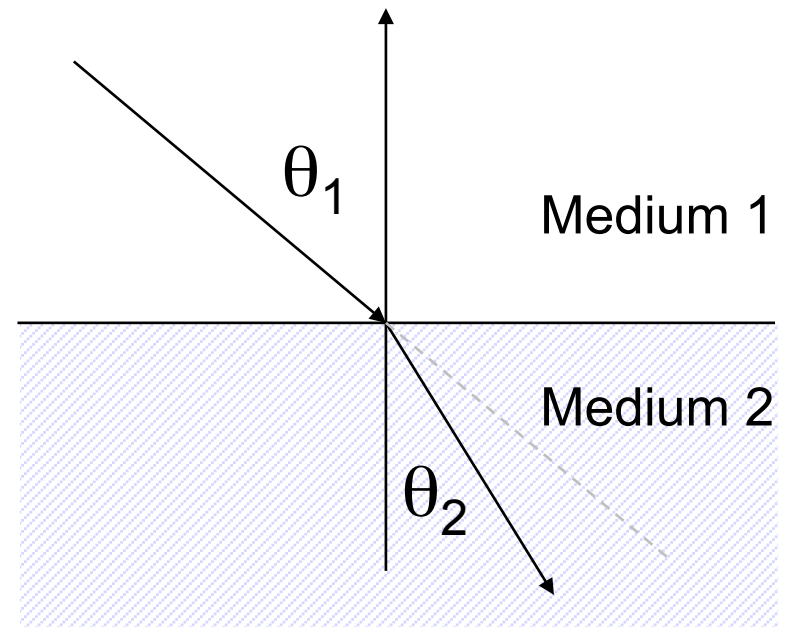


Ideal spiegelnde Reflexion

Geometrie des Reflektionsgesetzes



Geometrie des Brechungsgesetzes

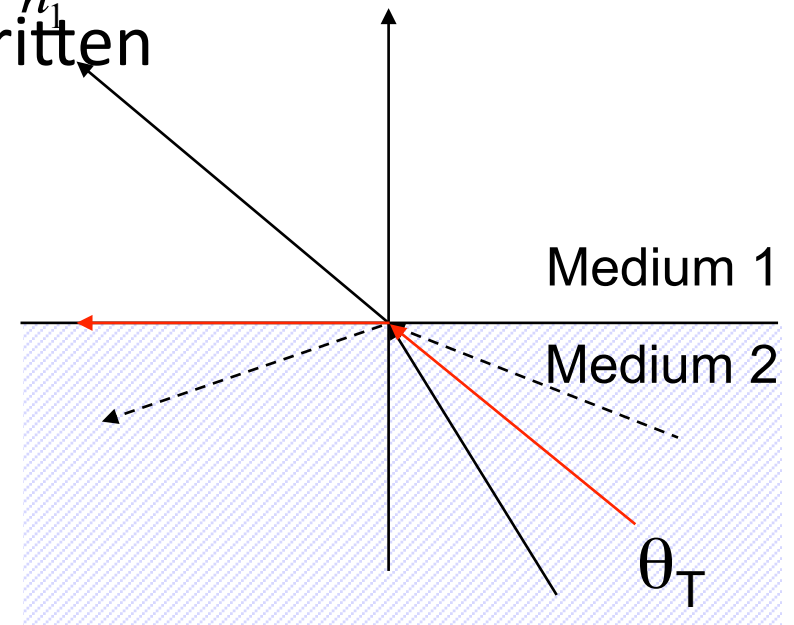


- Einfallender Strahl, Normale und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene
- Der Sinus des Einfallwinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels in einem konstanten Verhältnis
- Das Verhältnis hängt von der Natur der beiden Medien ab
- In Formeln
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Leftrightarrow \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \text{const.}$$
- n_1 bzw. n_2 sind dabei die Brechzahlen (Brechungsindizes)
 - Die Brechzahl ist definiert als das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium

Ideal spiegelnde Reflexion

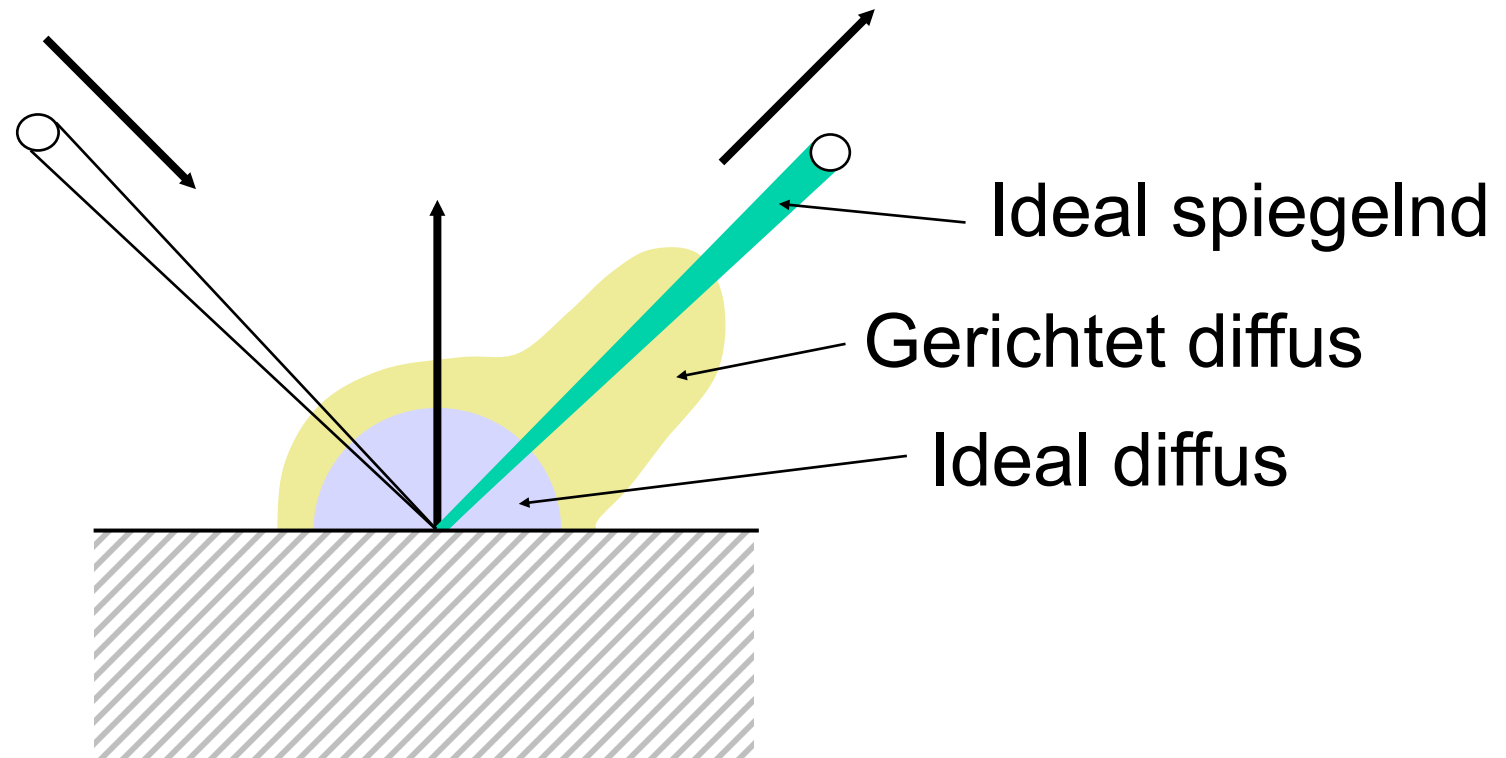
Totalreflexion

- Übergang von optisch dichteren in dünneres Medium $n_2 < n_1$
 - Es wird vom Einfallslot weggebrochen
 - Es gibt einen Einfallswinkel θ_T mit Brechungswinkel von 90°
 - Das Brechungsgesetz liefert: $\sin \theta_T = \frac{n_2}{n_1}$.
- Wird dieser Grenzwinkel θ_T überschritten
 - Übergang in das dünnere Medium nicht mehr möglich
 - Alles Licht wird an der Grenzfläche reflektiert
 - Totalreflexion



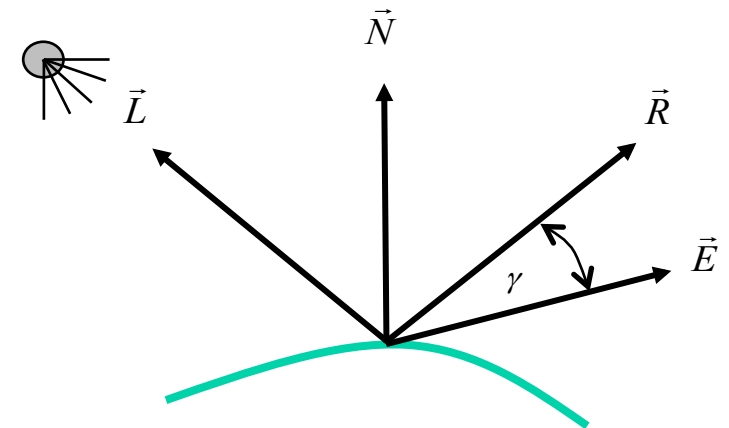
- Ideale Reflektoren (Lambert oder spiegelnd) sind selten
- Man muß also die Verteilung von $\rho_\lambda(\lambda, \phi_r, \theta_r, \phi_i, \theta_i)$ bestimmen
- Typisch ist
 - ein deutliches Maximum in Richtung der spiegelnden Reflexion
 - kleinerer Reflexionsgrad mit steigender Entfernung von dieser Achse
- Das heisst spekulare Reflexion
- CG-Modell spaltet die spekulare Reflexion
 - in einen richtungsunabhängigen, diffusen Anteil (Index d)
 - einen richtungsabhängigen Anteil (Index s)

Gerichtet diffuse Reflexion



- Der richtungsabhängige Anteil wird modelliert durch

$$r_s = r_{s,0} \cos^m \gamma$$

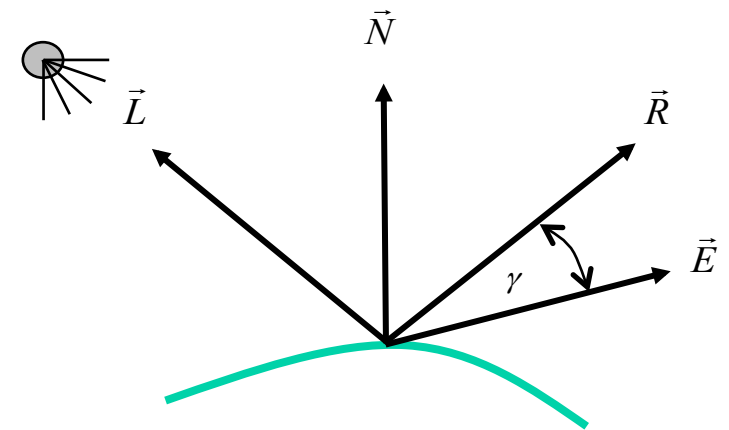


- $r_{s,0}$ ist eine Konstante zwischen 0 und 1
- γ ist der Winkel zwischen der Richtung des ideal reflektierten Strahls und der Beobachtungsrichtung
- Der Exponent m gibt an, wie schnell das Reflexionsvermögen mit größer werdendem Winkel abfällt.

- L_{spec} diffus reflektierte Leuchtdichte
- r_s diffuser Reflexionsgrad
- L Leuchtdichte des einfallenden Lichts
- γ Winkel zwischen refl. Strahl und Beobachterrichtung
- m Bündelung des reflektierten Lichts

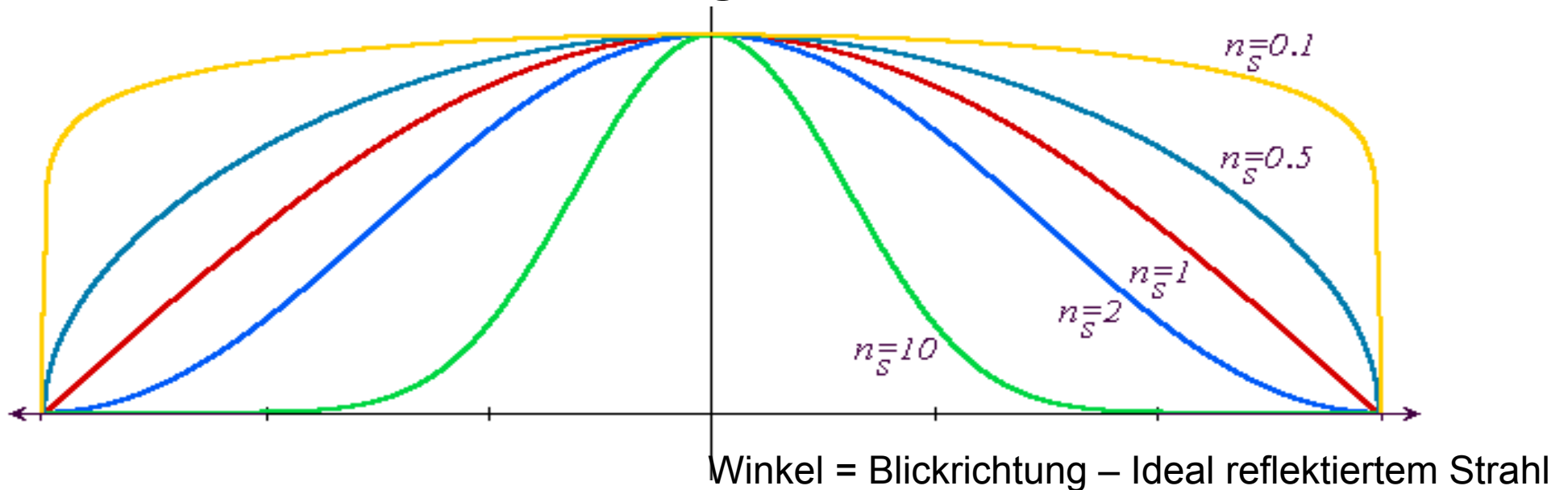
$$L_{spec} = \begin{cases} r_s \cdot L \cdot (\cos \gamma)^m, & \text{falls } |\gamma| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} r_s \cdot L \cdot (\vec{R} \cdot \vec{E})^m, & \text{falls } (\vec{R} \cdot \vec{E}) > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$



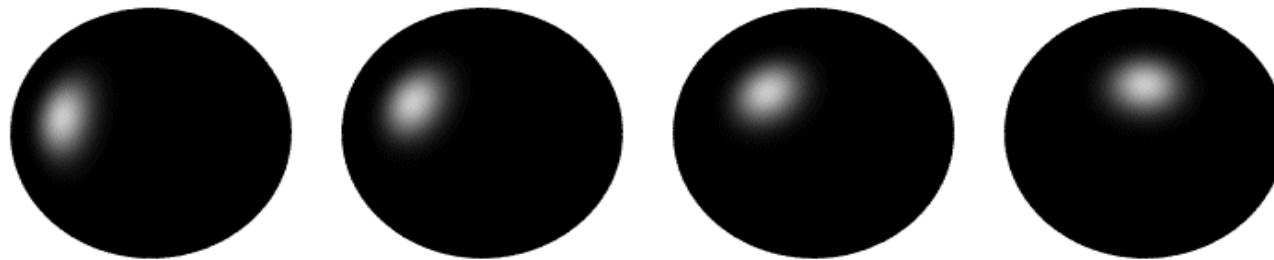
Phong Beleuchtung: Der Exponent m

- Phong Reflexions Term wird kleiner mit zunehmendem Winkel zwischen Blickrichtung und ideal reflektiertem Strahl

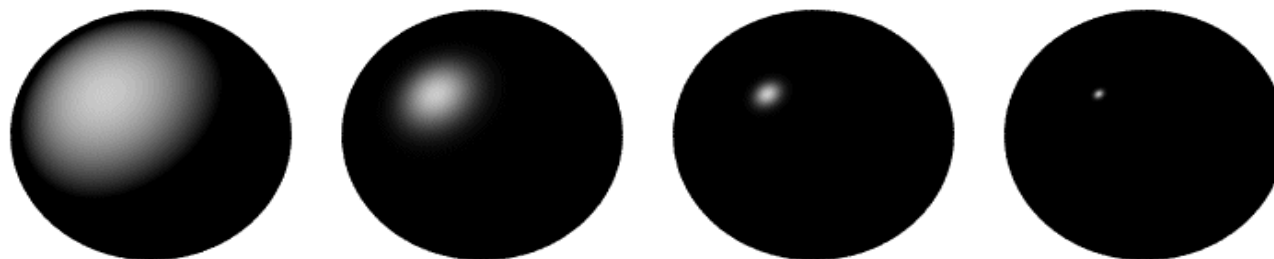


- Was wird hierdurch visuell gesteuert ?

Variation von L



Variation von m



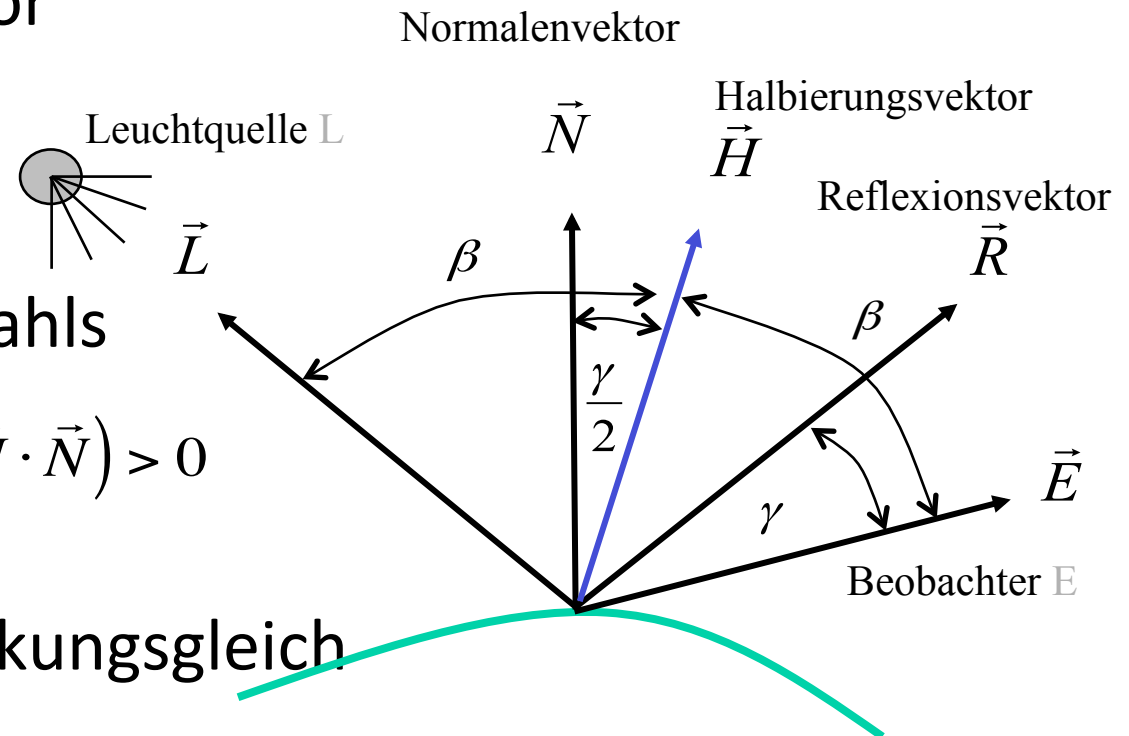
- Um die Berechnung des reflektierten Strahls zu vermeiden, verwendet Blinn den Bisektor

$$\vec{H} = \frac{\vec{E} + \vec{L}}{\|\vec{E} + \vec{L}\|}$$

- anstatt des reflektierten Strahls

$$L_{spec} = \begin{cases} r_s \cdot L \cdot (\vec{H} \cdot \vec{N})^n, & \text{falls } (\vec{H} \cdot \vec{N}) > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- Der Exponent n ist nicht wirkungsgleich mit dem Exponenten m

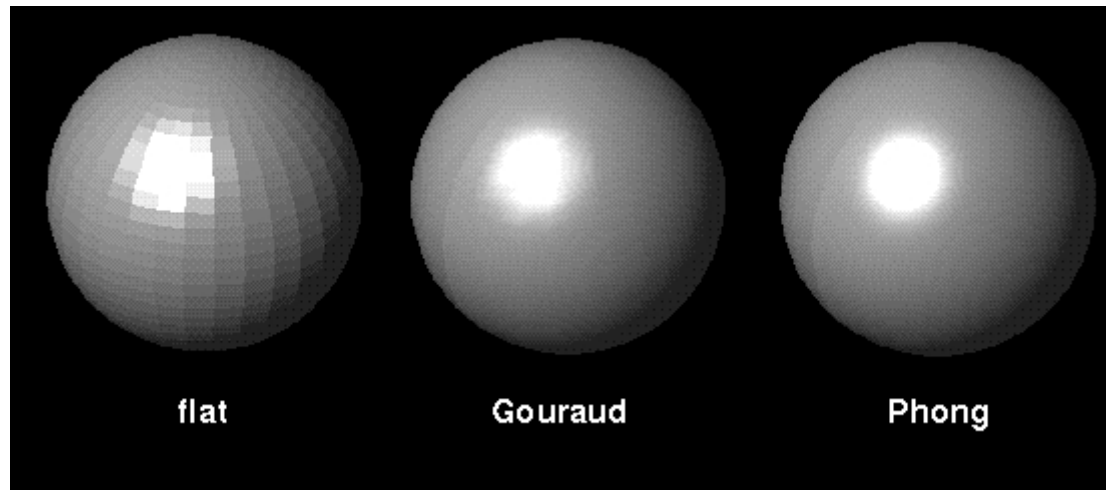


- Beleuchtungsmodelle
 - Ambient
 - Normalen sind irrelevant
 - Lambert / ideal diffus
 - Winkel zwischen Flächennormale und Lichtstrahl
 - Phong / spekulär
 - Flächennormale, Lichtstrahl, und Betrachterstandpunkt (Sehstrahl)

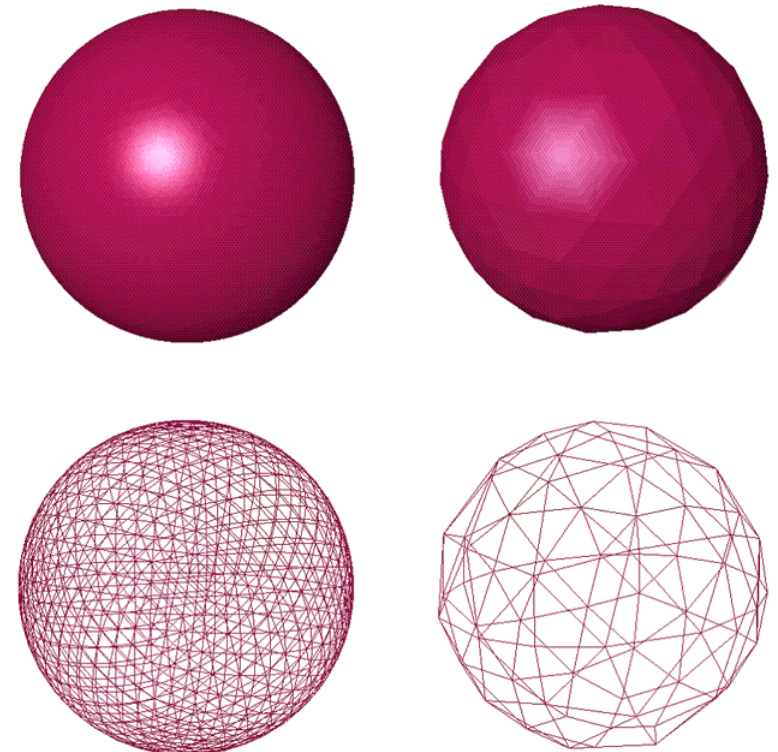
- Die Bestimmung der Leuchtdichten pro Pixel findet in der Praxis erst während der Rasterisierung statt
- Man kann aber ganz allgemein unterscheiden:
- Flat Shading
 - Normale des Primitivs ergibt einheitliche Helligkeit
- Gouraud Shading
 - Normale in den Eckpunkten ergibt Helligkeitswerte für die Eckpunkte
 - Helligkeitswerte der Eckpunkte werden linear interpoliert
- Phong Shading
 - Eckpunkt-Normalen werden für jeden Punkt linear interpoliert und normiert
 - Helligkeitswert ergibt sich aus interpolierter Normale

Beleuchtung eines Primitivs

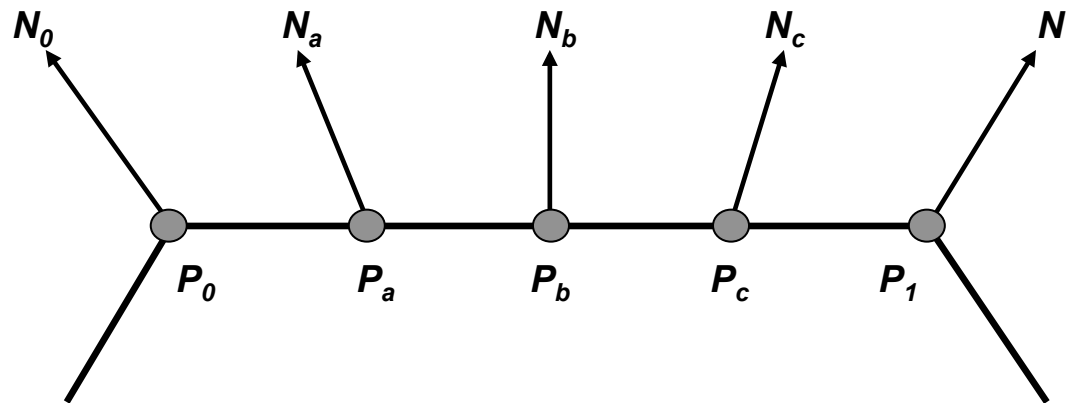
- Die Bestimmung der Leuchtdichten pro Pixel findet in der Praxis erst während der Rasterisierung statt



- Qualität hängt von der Grösse der projizierten Primitive ab (relativ zur Pixelgrösse)
- Grundsätzliches Problem: Helligkeitsextrema liegen immer in den Eckpunkten der Primitive



- Lineare Interpolation von Normalen (nicht Intensitäten) auf der aktuellen Scanline



- Beleuchtungsmodell wird für jedes Pixel ausgewertet
 - Deswegen langsamer
 - Aber Helligkeitsextrema können auch auf den Primitiven liegen