

7.2 Modellierung optischer Effekte (I)

Problem: Bei Pixel (i, j) ist ein Punkt bzw. ein kleines Flächenstück von Objekt O_k sichtbar.

Wie viel Licht fällt auf dieses Flächenstück, und wie viel davon wird in Richtung des Pixels weitergegeben?

Bemerkung 7.6: Die folgenden Gleichungen sind jeweils für alle im Lichtmodell vorkommenden Wellenlängen(bereiche) zu betrachten, also z. B. für R, G, B.

Die vorkommenden Koeffizienten (für Reflexion usw.) sind i. Allg. abhängig von der betrachteten Wellenlänge.

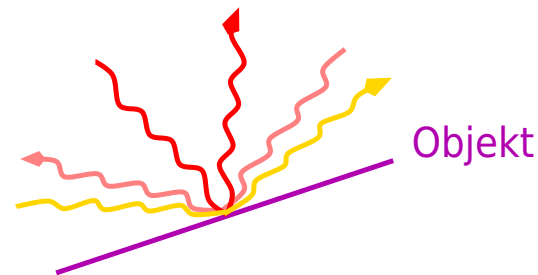
Bemerkung 7.7: Die folgenden Modelle sind alle mehr oder weniger reine **Heuristik**; für viele Anwendungen sind sie jedoch völlig ausreichend.

Ziel ist es, bestimmte Effekte mit möglichst **geringem Rechenaufwand** nachzuahmen.

7.2.1 Ambientes Licht

Motivation: Eine Szene wird meist auch durch Licht erhellt, dem kein Ursprung und keine Richtung mehr zugeordnet werden kann, z. B.

- Tageslicht durch die Atmosphäre (aber nicht direktes Sonnenlicht),
- Licht einer Lampe, das bereits mehrmals an matten Wänden reflektiert wurde.

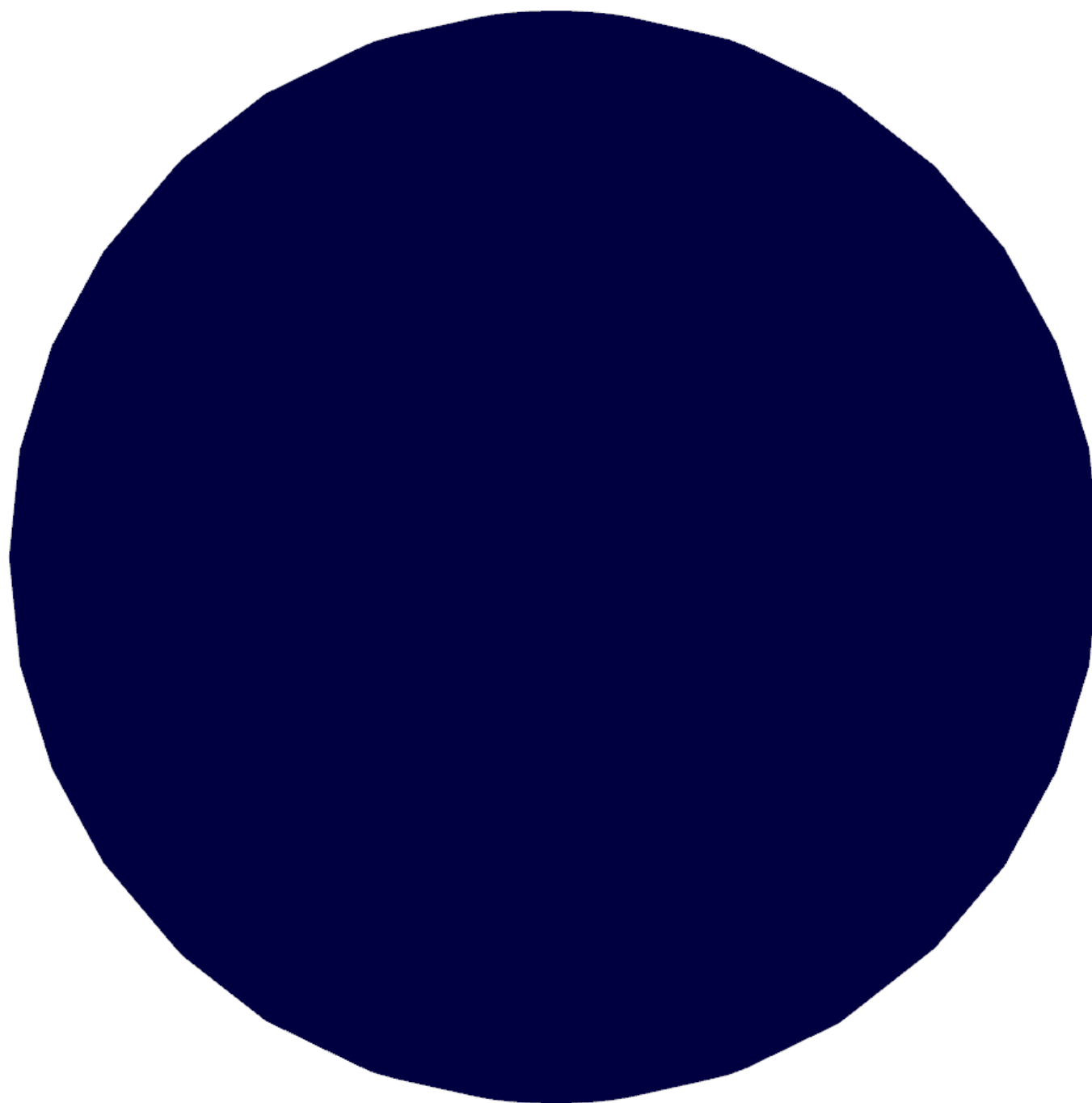


Modell: Die Rückstrahlung hängt nur von der Gesamtintensität des einfallenden ambienten Lichts und von den Materialeigenschaften des Objekts ab, nicht von der Orientierung des Objekts (z. B. bezüglich des „Augenpunktes“).

$$\underbrace{I_a(\mathbf{P})}_{\text{Intensität des bei Punkt } \mathbf{P} \text{ reflektierten ambienten Lichts}} = \underbrace{I_a}_{\text{Intensität des ambienten Lichts in der Szene}} \cdot \underbrace{R_{k,a}}_{\text{Reflexionskoeffizient von Objekt } k \text{ für ambientes Licht}}$$

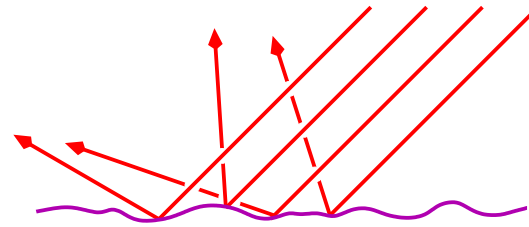
⇒ Die Intensität des reflektierten ambienten Lichts ist für alle zu einem Objekt gehörigen Pixel gleich.

⊖ In der Realität ist ambientes Licht i. Allg. abhängig vom Ort \mathbf{P} und besitzt oft (abhängig von \mathbf{P}) bevorzugte Richtungen.

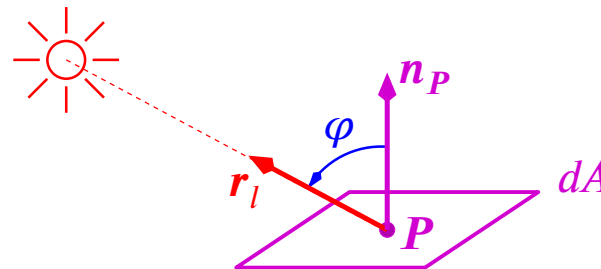


7.2.2 Diffuse Reflexion

Motivation: Die Oberfläche der Objekte ist i. Allg. nicht völlig eben. Kleinste Unebenheiten führen zur Streuung des einfallenden Lichts.



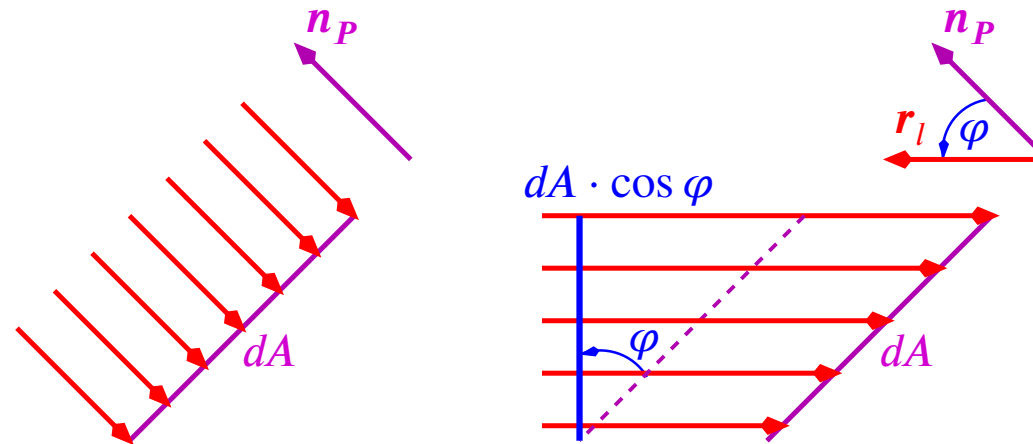
Modell: Ein Teil des (von einer Lichtquelle) beim Punkt P eintreffenden Lichts wird in alle Richtungen gleichmäßig reflektiert. Die Rückstrahlung hängt nur von der Menge des einfallenden Lichts und den Materialeigenschaften ab, nicht von der Orientierung des Objekts bzgl. des Augenpunktes.



n_P : Einheitsnormale zu Objekt k im Punkt P

r_l : Einheitsvektor in Richtung zu Lichtquelle L_l

dA : kleines Flächenstück von Objekt k

Beobachtung:

Der Lichteinfall auf die Fläche ist proportional zu

$$\cos \varphi = \mathbf{n}_P^T \cdot \mathbf{r}_l.$$

(Lambertsches [Kosinus-]Gesetz)

Insgesamt folgt:

$$\underbrace{I_d(\mathbf{P})}_{\text{bei Punkt } \mathbf{P} \text{ diffus reflektiertes Licht}} = \sum_l \underbrace{(\mathbf{n}_P^T \cdot \mathbf{r}_l)}_{\text{über alle Lichtquellen}} \cdot \underbrace{I_l}_{\text{Intensität des von Lichtquelle } l \text{ ausgehenden Lichts}} \cdot \underbrace{R_{k,d}}_{\text{Reflexionskoeffizient von Objekt } k \text{ für diffuse Reflexion}}$$

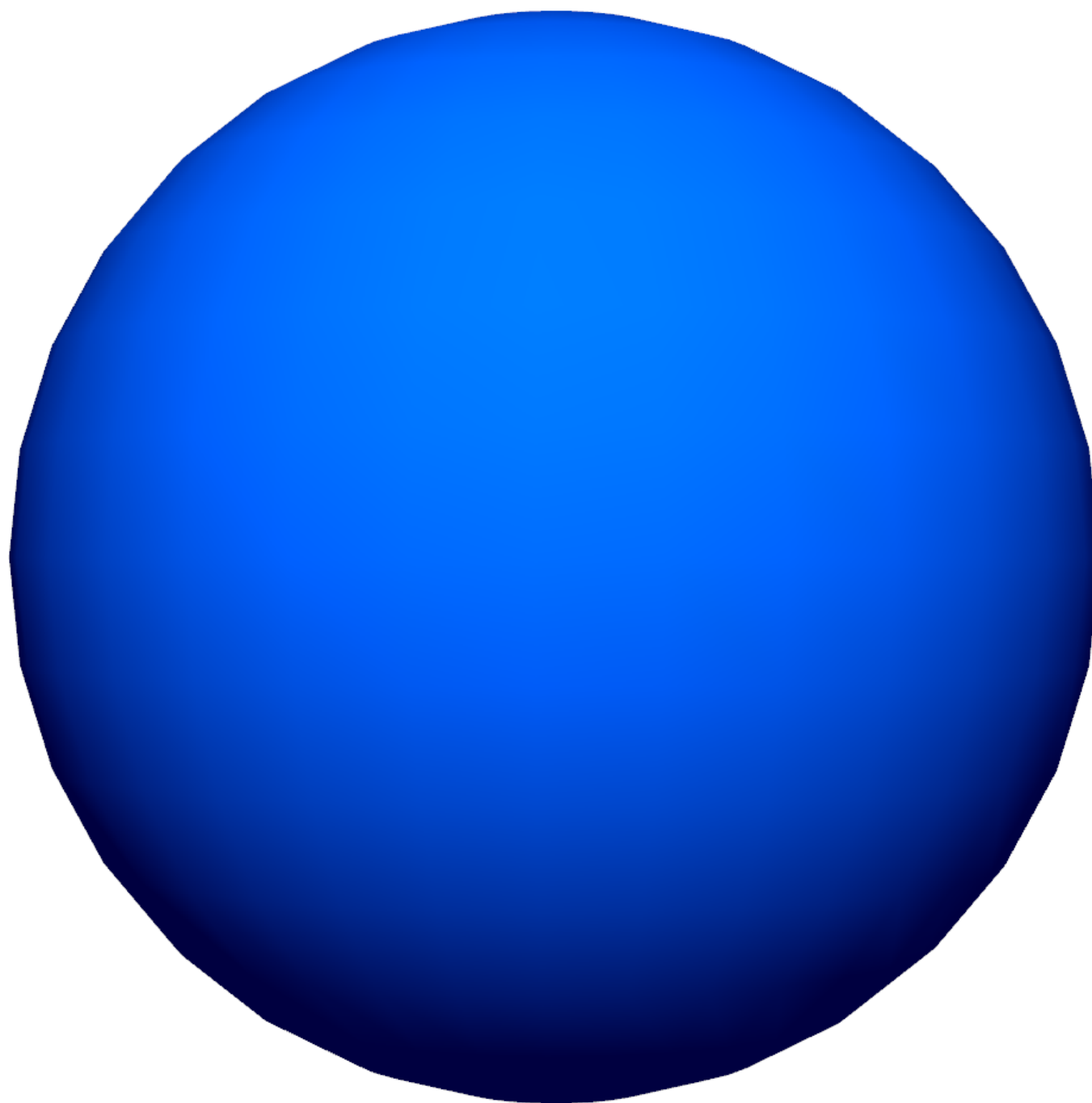
Johann Heinrich Lambert
* 1728, Mülhausen (damals zur Schweiz, heute Elsass, Frankreich)
† 1777, Berlin

Mathematiker, Physiker, Philosoph

Foto: ?, Lithographie: Godefroy Engelmann
Quelle: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JHLambert.jpg>



⊖ Diffuse Reflexion ist in der Realität meist nicht völlig unabhängig vom „Ausfallswinkel“.

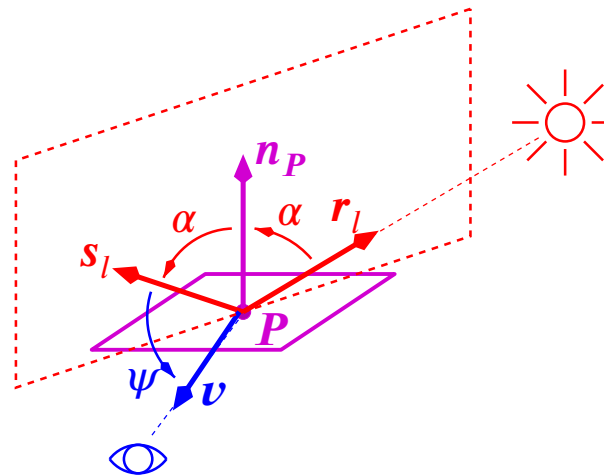


7.2.3 Winkelabhängige Reflexion

Motivation: Bei glatten, stark spiegelnden Oberflächen ist die Reflexion in die durch das „Spiegelgesetz“

Einfallswinkel = Ausfallswinkel

gegebene Richtung s am stärksten, in andere Richtungen nimmt sie rasch ab.



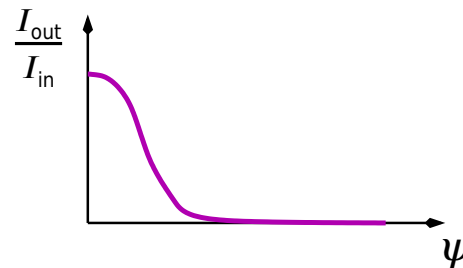
v : Einheitsvektor in Richtung des Augenpunktes

n_P : Einheitsnormale zu Objekt k im Punkt P

r_l : Einheitsvektor in Richtung der Lichtquelle L_l

s_l : Einheitsvektor in der durch das Spiegelgesetz gegebenen Richtung
$$= 2 (n_P^T \cdot r_l) \cdot n_P - r_l$$

typische Abhängigkeit:



Modell: Der Ansatz

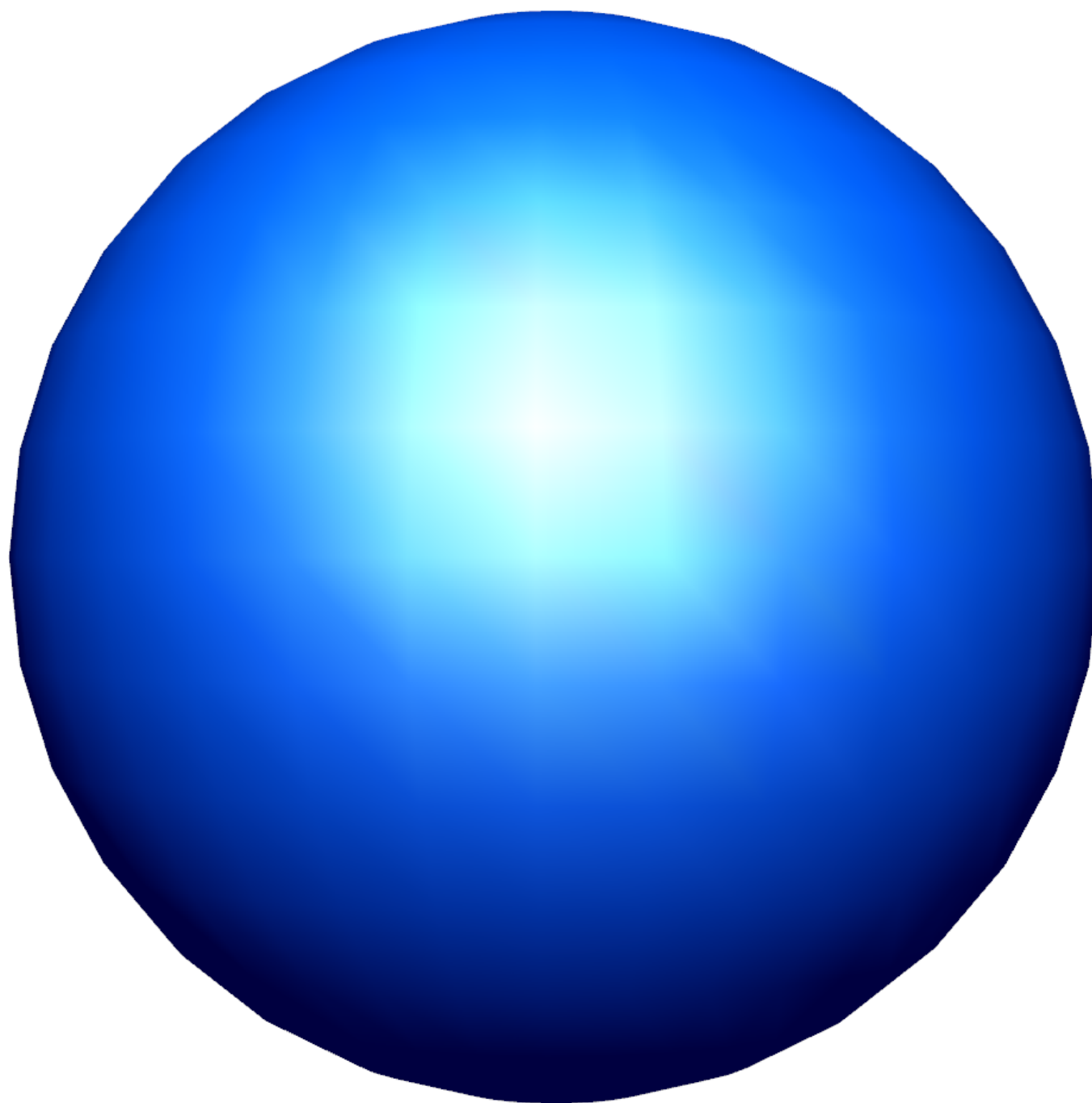
$$I \underbrace{\approx}_{\text{proportional}} \underbrace{(\cos \psi)^{\nu_k}}_{\substack{\text{Exponent vom} \\ \text{Objekt abhängig}}} = (\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{s}_l)^{\nu_k}$$

liefert bei verhältnismäßig geringem Aufwand brauchbare Ergebnisse.

- ν_k „klein“ (z. B. $\nu_k = 5$): Die hellen Flecken (**Glanzlichter**) werden relativ groß und nicht sehr scharf.
- ν_k „groß“ (z. B. $\nu_k = 40$): Glanzlichter werden kleiner und schärfer.

Insgesamt folgt:

$$\underbrace{I_w(\mathbf{P})}_{\substack{\text{bei Punkt } \mathbf{P} \\ \text{winkelabhängig} \\ \text{reflektiertes Licht}}} = \sum_l \underbrace{(\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{s}_l)^{\nu_k}}_{\substack{\text{über alle} \\ \text{Lichtquellen}}} \cdot \underbrace{I_l}_{\substack{\text{Intensität des von} \\ \text{Lichtquelle } l \\ \text{ausgehenden Lichts}}} \cdot \underbrace{R_{k,w}}_{\substack{\text{Reflexionskoeffizient} \\ \text{von Objekt } k \text{ für} \\ \text{winkelabhängige} \\ \text{Reflexion}}}$$



7.2.4 Entfernungsabhängige Dämpfung

Motivation: Punkt \mathbf{P} (bzw. Flächenstück dA) auf Objekt O_k erhält umso mehr Licht von Lichtquelle L_l , je geringer der Abstand ist:

$$I_l \sim \frac{1}{d_l^2} \quad \text{mit} \quad d_l = \|\mathbf{P} - L_l\|_2 \quad (7.1)$$

(Aus der unterschiedlichen Beleuchtung gewinnt das menschliche Sehsystem Information über die Lage der Objekte.)

Bemerkung 7.8: Der Ansatz (7.1) wäre für **Punktlichtquellen** korrekt. Solche kommen aber in der Praxis nicht vor.

⇒ Für Objekte, die sehr nahe bei der Lichtquelle liegen, wird der Helligkeitsunterschied unrealistisch groß.
(Für Objekte, die weit entfernt sind, ist der Helligkeitsunterschied kaum noch wahrnehmbar.)

Heuristik: Verwende einen „**Dämpfungsfaktor**“ der Form

$$f_l(\mathbf{P}) = \min\left(\frac{1}{c_{l,0} + c_{l,1} \cdot d_l + c_{l,2} \cdot d_l^2}, 1\right),$$

wobei die $c_{l,i}$ nur von der Lichtquelle abhängen.

- $c_{l,2}$ liefert die Gesetzmäßigkeit (7.1),
 - $c_{l,0}$ verhindert, dass I in der Nähe der Lichtquelle zu stark variiert,
 - $c_{l,1}$ erhöht die Variation von I in größerer Entfernung.
- ⊕ Bei geschickter Wahl der $c_{l,i}$ kann der räumliche Eindruck deutlich verbessert werden.
- ⊖ Die Wahl der $c_{l,i}$ erfolgt völlig heuristisch.

Bemerkung: OpenGL verzichtet auf das Minimum mit 1; soll Verstärkung verhindert werden, kann $c_{l,0} \geq 1$ gewählt werden.