

Farbe bei der Beleuchtung und Schattierung

- ▶ Die *Computergrafik arbeitet* bis zur Ermittlung der tatsächlichen Farbreize *strahlungsphysikalisch, wenn, wie oben geschehen, wellenlängenabhängig gearbeitet wird*. Sonderfälle, wie im vorausgegangenen Beispiel, sind daraus ableitbar.
- ▶ Farbige Lichter und Oberflächen sind auf der Basis der oben verwendeten, wellenlängenabhängigen Betrachtungsweise und im Zusammenhang mit dem Kapitel „Licht, Hellempfinden und Farbe“ farbmétrisch exakt behandelbar.
- ▶ Die exakte Vorgehensweise

$$\underline{F} = \begin{Bmatrix} R \\ G \\ B \end{Bmatrix} = k \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \begin{Bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{Bmatrix} \cdot \varphi(\lambda) \cdot d\lambda$$

wird in der *praktischen Arbeit* (auch für Messzwecke ausreichend) durch eine *Summe von Produkten hinreichend vieler Samples* ersetzt (z.B. 380 nm bis 780 nm in 5 nm - Schritten → 81 Samples, z.T. auch ca. 200 Samples in 2 nm-Schritten).

$$\underline{F} = \begin{Bmatrix} R \\ G \\ B \end{Bmatrix} = k \cdot \sum_{\lambda_i} \begin{Bmatrix} \bar{r}_{\lambda_i} \\ \bar{g}_{\lambda_i} \\ \bar{b}_{\lambda_i} \end{Bmatrix} \cdot \varphi_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda = k \cdot \begin{Bmatrix} -T \\ \underline{r}_{\lambda} \\ -T \\ \underline{g}_{\lambda} \\ -T \\ \underline{b}_{\lambda} \end{Bmatrix} \cdot \underline{\varphi}_{\lambda}$$

Vereinfachte Modelle für farbige Lichter und Oberflächen

- ▶ Spektralwertkurven sowie Remissions- und Strahlungsfunktionen sind meist so *niederfrequent (stetig, glatt)*, dass sie *mit 5nm-Samples hinreichend abgetastet* werden (kritische Fälle: einige Fluoreszenzleuchten . . . , Interferenzfilter etc. → sind für die Computergraphik kaum von Bedeutung).

Aber trotzdem:

- ▶ erhöhter Rechenaufwand, da viele Samples (bei 5 nm: 81) im Beleuchtung- und Reflexionsmodell verarbeitet werden müssen (insbesondere bei vielen Quellen mit unterschiedlicher Charakteristik bedeutsam)
- ▶ problematisch bei „Phantasiefarben“ für freien Entwurf (man müsste sich spektrale Charakteristiken „ausdenken“, die bei den gewählten Beleuchtungen dem gewünschten Aussehen entsprechen)

Vereinfachungen und „Workflow“:

- ▶ *Die Interaktion von Licht und Objekt wird vereinfachend durch getrennte dreikomponentige Modelle für Objektremittanz und Intensität der Quellen* erfasst, d.h.
→ wir bleiben zunächst bei Strahlungsgrößen → es werden 3 Samples verwendet
- ▶ Dazu werden Mittelwerte (Integrale) in drei Intervallen abgetastet (schmalbandige Abtastung wäre wegen der Unterabtastung extrem problematisch).
- ▶ Die Bewertung mit 3 · 3 Faktoren, die den rgb- oder den xyz-Normspektralwertkurven entsprechen, d.h. die Umwandlung der „Strahlungsgrößen“ in „Farbvalenzen“, nehmen wir erst am Ende vor!!

Vereinfachte Modelle für farbige Lichter und Oberflächen

- ▶ Wir sind uns bewusst, dass auch diese Abtastung von wenigen Mittelwerten zur Beschreibung von β_λ und S_λ eindeutig unzureichend und damit fehlerhaft ist! (siehe auch Foley90, S. 726 / 773 und abschließende Diskussion weiter unten)
- ▶ Aber:
 - leicht zu implementieren
 - *oft werden akzeptable Ergebnisse erreicht*
- ▶ Am Ende des Kapitels wird einigen sehr empirischen Darstellungen gefolgt, die keinen direkten metrischen Bezug zur Physik oder zur Colorimetrie mehr aufweisen. → Zur Beschreibung von Quellen und beleuchteten Oberflächen wird statt L, Strahlstärke I und E der abstrakte Begriff „Intensität“ I verwendet (diese Darstellungen laufen den Auffassungen des Autors zuwider und sind nur aufgenommen worden, um den Bezug zu einigen Darstellungen in der Literatur herzustellen).

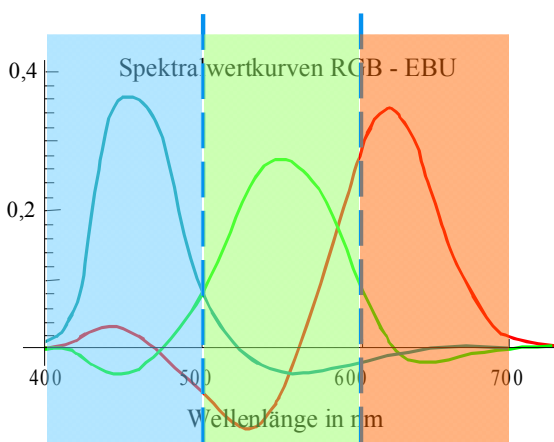
Spektrales Sampling

Festlegung der Samplingintervalle:

- ▶ Farbe ist Sinneswahrnehmung → nur der visueller Spektralbereich ist bedeutsam.
- ▶ *Zapfeneigenschaften und Farbsynthesesystem spiegeln sich zusammen in den rgb-Spektralwertkurven wider → Basis für die Auswahl der drei Intervalle*

spektrales Sampling - Die Spektralwertkurven

→ Definition sinnvoller Intervalle mittels RGB_{EBU} -Spektralwertkurven:

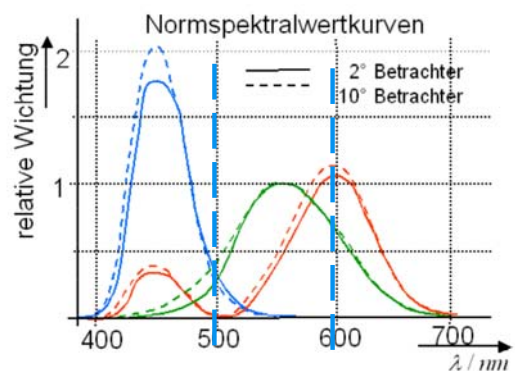


$$\Delta\lambda_{VR} = \Delta\lambda_{VG} = \Delta\lambda_{VB} = \Delta\lambda_{vis} / 3 = \Delta\lambda_T$$

$$VB = [400nm, 500nm)$$

$$\text{Intervalle : } VG = [500nm, 600nm)$$

$$VR = [600nm, 700nm)$$



$$r_{ebu_{VR(VG,VB)}} = \frac{1}{\Delta\lambda_T} \cdot \int_{VR(VG,VB)} \bar{r}_{ebu,\lambda} \cdot d\lambda \quad (9 \text{ Werte})$$

analog für $g_{ebu_{VR(VG,VB)}}$ und $b_{ebu_{VR(VG,VB)}}$

$$x_{VR(VG,VB)} = \frac{1}{\Delta\lambda_T} \cdot \int_{VR(VG,VB)} \bar{x}_\lambda \cdot d\lambda$$

analog für $y_{VR(VG,VB)}$ und $z_{VR(VG,VB)}$ (9 Werte)

Samples der Spektralwertkurven

- Um für äquienenergetisches Weiß als Quelle und ideal weißer Remission die Farbvalenz

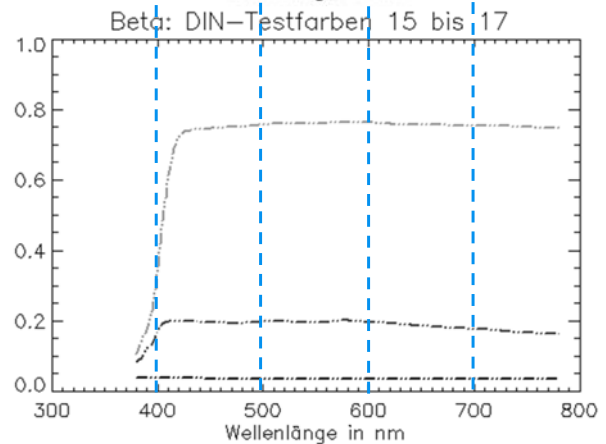
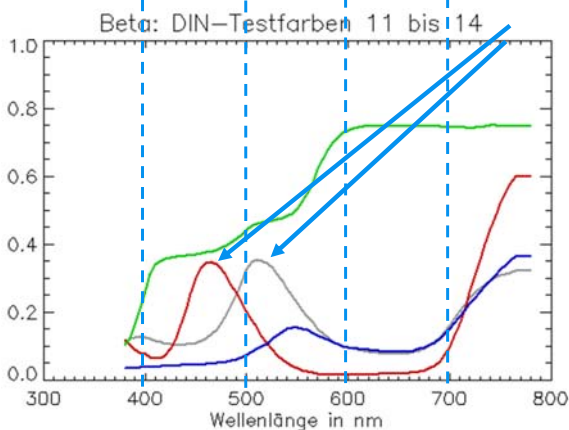
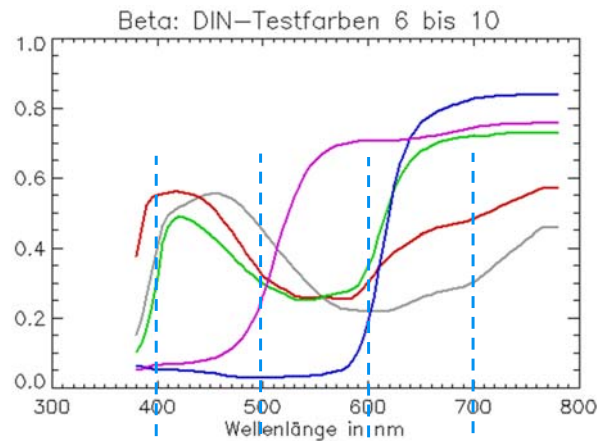
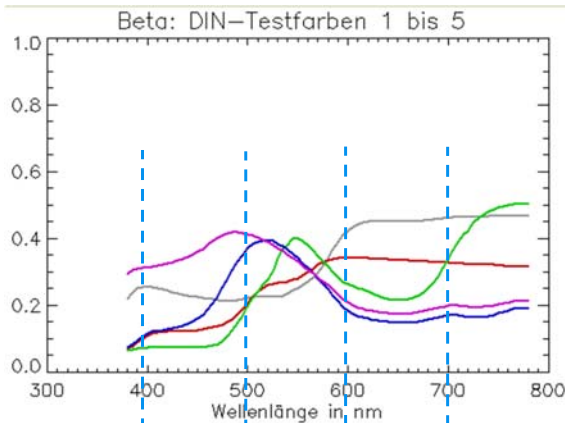
$$\underline{E}_{\text{weiß}} = \{1 \quad 1 \quad 1\}^T$$

zu erhalten, werden die abgetasteten Mittelwerte auf eine Summe von 1 normiert.

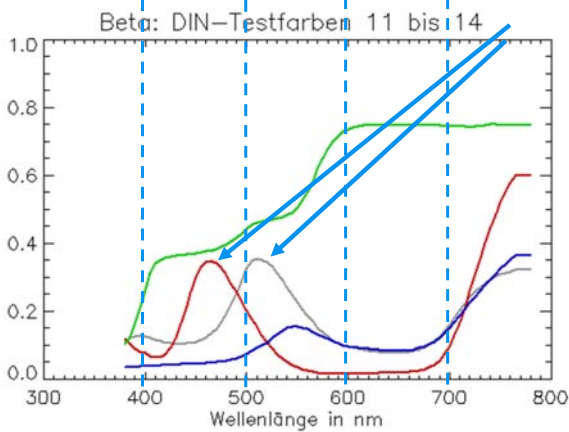
	i=VB	i=VG	i=VR
r_ebu _i	-0.0225	0.1941	0.8284
g_ebu _i	-0.0084	1.0515	-0.0431
b_ebu _i	1.1183	-0.1012	-0.0170

	i=VB	i=VG	i=VR
x _i	0.1666	0.4250	0.4084
y _i	0.0607	0.7506	0.1888
z _i	0.9518	0.0481	0.0001

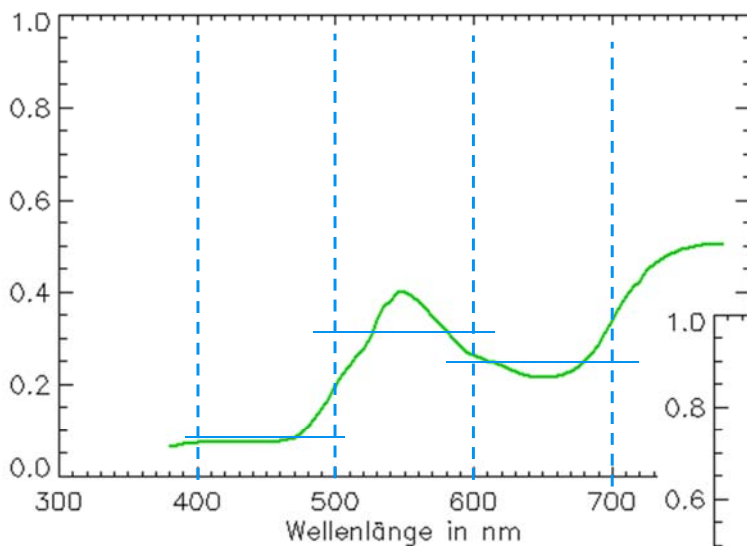
Sampling der Remittanzen: $\beta(\lambda)$ der DIN - Testfarben



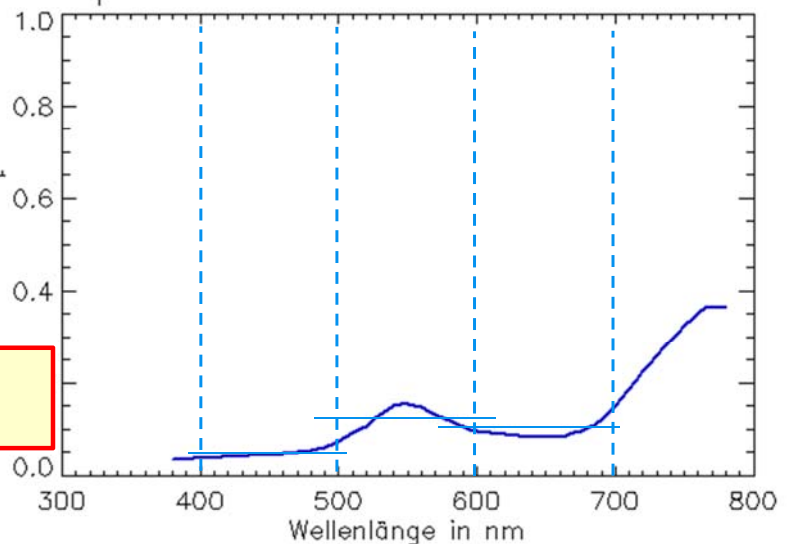
► Forderung ans Licht: möglichst breitbandig, d.h. über λ langsam veränderlich:
 Bei schmalbandiger Beleuchtung könnten je nach $\beta(\lambda)$ Probleme entstehen. Würde z.B. schmalbandig mit ca. 410nm, 590nm und 650nm weiß beleuchtet, entstünden mit den markierten Kurven ein dunkelgrauer (rote Kurve) und ein mittelgrauer Eindruck (graue Kurve) wie bei den unteren beiden Kurven des rechten Diagramms.



Objektremittanzen O_R, O_G, O_B aus $\beta(\lambda)$



► Beschreibung durch drei Mittelwerte in den gewählten Intervallen



➔
$$O_{R(G,B)} = \frac{1}{\Delta\lambda_T} \cdot \int_{VR(VG,VB)} \beta_\lambda \cdot d\lambda$$

Objektremittanzen O_R, O_G, O_B für die DIN-Testfarben

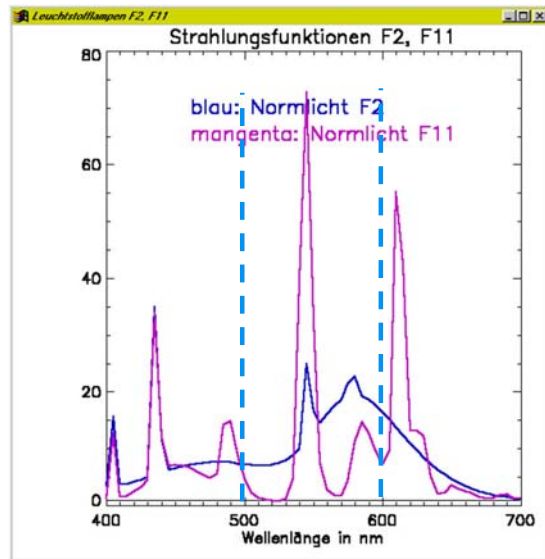
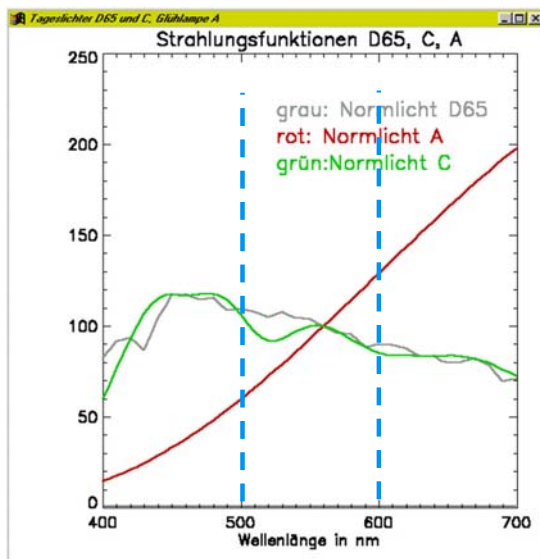
► Für die Remittanzen gilt: $0 \leq \beta(\lambda) = \beta_\lambda \leq 1$

Bei der Mittelwertbildung und Abtastung erfolgt keine Normierung, so dass o.g. Eigenschaft und das Grundverhalten der Farbstoffe im Sinne dieser Mittelwerte erhalten bleiben.

TF-Nr.	O_B	O_G	O_R
1	0,2298	0,2741	0,4497
2	0,1337	0,2861	0,3359
3	0,0887	0,3190	0,2425
4	0,1898	0,3257	0,1583
5	0,3641	0,3295	0,1848
6	0,5174	0,3040	0,2537
7	0,4945	0,2718	0,4183
8	0,4136	0,2726	0,6160
9	0,0412	0,0471	0,6516

TF-Nr.	O_B	O_G	O_R
10	0,1014	0,5792	0,7184
11	0,1430	0,2357	0,0914
12	0,2128	0,0653	0,0259
13	0,3688	0,5475	0,7465
14	0,0474	0,1224	0,0946
15	0,0375	0,0361	0,0350
16	0,1965	0,1993	0,1881
17	0,7041	0,7619	0,7584

Sampling der Intensitäten I_R, I_G, I_B aus $S(\lambda)$ z.B. für Normlichtquellen



$$I_{R(G,B)} = \frac{1}{\Delta\lambda_T} \cdot \int_{VR(VG,VB)} S_\lambda \cdot d\lambda$$

- Die Intensität der Lichtquellen kann je nach Leistung sehr unterschiedlich sein. *Die Normierung erfolgt zunächst auf das maximale Integral.* Die eigentliche Intensität wird dann über weitere Parameter gesteuert.

Lichtquelle	I_B	I_G	I_R
NL_D65	1,0000	0,9747	0,7880
NL_A	0,2050	0,5631	1,0000
NL_C	1,0000	0,9130	0,7829
NL_F2	0,6008	1,0000	0,4746
NL_F11	0,7060	1,0000	0,8008

Beispiele für vereinfachte Farbmodelle

$$\underline{I}_a = \begin{Bmatrix} I_{aR} \\ I_{aG} \\ I_{aB} \end{Bmatrix}, \quad \underline{I}_p = \begin{Bmatrix} I_{pR} \\ I_{pG} \\ I_{pB} \end{Bmatrix} \quad \text{„Farbige Lichtquellen“ für ambienten Anteil bzw. gerichtetes (Punkt-)Licht}$$

$$\underline{O}_a = \begin{Bmatrix} O_{aR} \\ O_{aG} \\ O_{aB} \end{Bmatrix}, \quad \underline{O}_d = \begin{Bmatrix} O_{dR} \\ O_{dG} \\ O_{dB} \end{Bmatrix}, \quad \underline{O}_s = \begin{Bmatrix} O_{sR} \\ O_{sG} \\ O_{sB} \end{Bmatrix} \quad \text{„Farbige Objektremittanzen“ für ambienten, diffusen und spekularen Anteil}$$

Die spekularen Objektremittanzen sind meist $\{1,1,1\}^T \rightarrow$ Farbe der Lichtquelle bleibt für diesen Anteil erhalten. Ausnahmen z.B. Kupfer.

\rightarrow Phong-Reflexionsmodell (im spekularen Term wird bei diesem Modell vordergründig davon ausgegangen, dass die Intensität der Quelle dominiert gegenüber der $\cos\alpha$ -Abhängigkeit aus der Bestrahlungsstärke):

$$\begin{Bmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} I_{aR} \\ I_{aG} \\ I_{aB} \end{Bmatrix} \cdot k_a \cdot \begin{Bmatrix} O_{aR} \\ O_{aG} \\ O_{aB} \end{Bmatrix} + f_{att} \cdot \begin{Bmatrix} I_{pR} \\ I_{pG} \\ I_{pB} \end{Bmatrix} \cdot \left(k_d \cdot \begin{Bmatrix} O_{dR} \\ O_{dG} \\ O_{dB} \end{Bmatrix} \cdot \cos \alpha + k_s \cdot \begin{Bmatrix} O_{sR} \\ O_{sG} \\ O_{sB} \end{Bmatrix} \cdot \cos^n \psi \right)$$

$$\cos \alpha = \underline{V}_l^T \cdot \underline{n}, \quad \cos^n \psi = \left(\underline{V}_r^T \cdot \underline{V}_e \right)^n$$

$\underline{V}_l \rightarrow$ Richtung der Lichtquelle
 $\underline{V}_e \rightarrow$ Betrachtungsrichtung (eye)
 $\underline{V}_r \rightarrow$ Reflexionsrichtung

Beispiele für vereinfachte Farbmodelle

- ▶ Oft wird auf die separate Steuerung der ambienten, diffusen und spekularen Anteile (k_a, k_d, k_s) verzichtet und mit kompakten Reflexionsfaktoren für die Farben gearbeitet:

→ Phong-Reflexionsmodell:

$$\begin{pmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{aR} \\ I_{aG} \\ I_{aB} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{amb R} \\ R_{amb G} \\ R_{amb B} \end{pmatrix} + f_{att} \cdot \begin{pmatrix} I_{pR} \\ I_{pG} \\ I_{pB} \end{pmatrix} \cdot \left(\begin{pmatrix} R_{diff R} \\ R_{diff G} \\ R_{diff B} \end{pmatrix} \cdot \cos \alpha + \begin{pmatrix} R_{spek R} \\ R_{spek G} \\ R_{spek B} \end{pmatrix} \cdot \cos^n \psi \right)$$

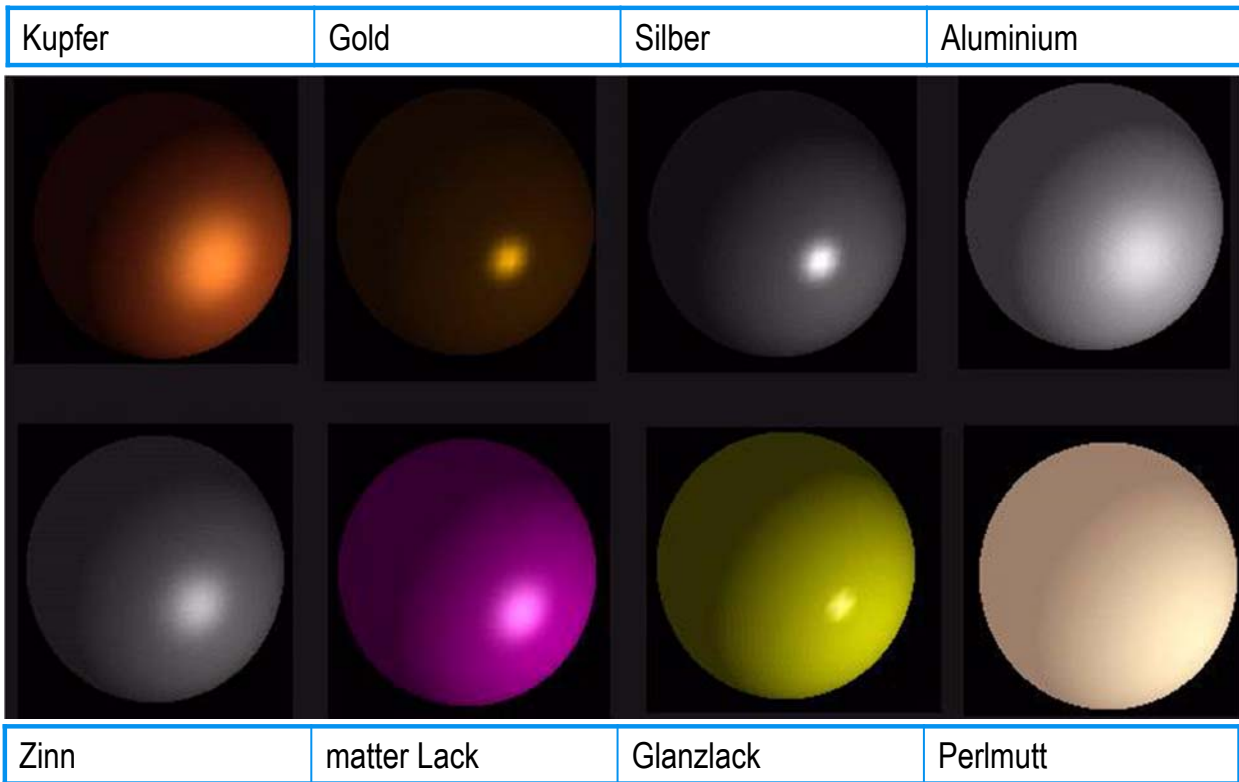
- ▶ Werden Intensitäten auf der beleuchteten Oberfläche betrachtet (z.B. statt der Strahlstärken), entfällt der Abschwächungsfaktor f_{att}
- ▶ und im Falle einer einzigen Quelle kann der Unterschied zwischen I_a und I_p in den Vektor \underline{R}_{amb} integriert werden → hier \underline{R}_{amb}^* (*)

$$\begin{pmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{0R} \\ I_{0G} \\ I_{0B} \end{pmatrix} \cdot \left(\begin{pmatrix} R_{amb R}^* \\ R_{amb G}^* \\ R_{amb B}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{diff R} \\ R_{diff G} \\ R_{diff B} \end{pmatrix} \cdot \cos \alpha + \begin{pmatrix} R_{spek R} \\ R_{spek G} \\ R_{spek B} \end{pmatrix} \cdot \cos^n \psi \right)$$

Beispiele für vereinfachte Farbmodelle

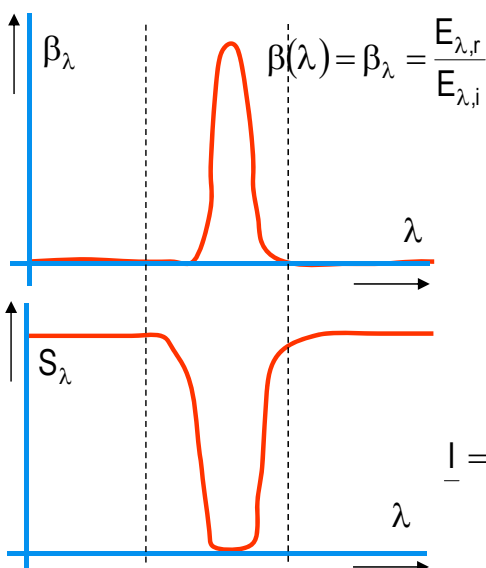
Material	Exponent	$R_{diff} (R,G,B)$			$R_{spek} (R,G,B)$		
		R	G	B	R	G	B
Kupfer	n=2	1,0	0,5	0,4	0,9	0,7	0,3
Gold	n=32	0,5	0,5	0,0	1,0	1,0	0,0
Silber	n=32	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
Aluminium	n=4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Zinn	n=8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
matter Lack	n=8	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Glanzlack	n=64	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0

Parameter verschiedener Materialien für das vereinfachte Farbmodell



Probleme durch einfaches spektrales Sampling (Bewertung)

- Wie erwähnt, sind die einfachen Modelle für farbige Lichter und Oberflächen fehlerhaft und können nur unter bestimmten Bedingungen als Approximation betrachtet werden.
- Im Folgenden soll das ein wenig begründet und andiskutiert werden. → Sinn:
 - Einschätzbarkeit der Approximationsgüte
 - Wann ist die grobe Näherung verwendbar ?
 - Gibt es weitere, bessere Kompromisse ?



Im links dargestellten Fall ergibt die spektrale Rechnung → Schwarz

$$\underline{F} = \begin{Bmatrix} R \\ G \\ B \end{Bmatrix} = k \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \begin{Bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{Bmatrix} \cdot \beta(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Mit den Farbwerten für das Licht und das Objekt ergibt sich (Abtasten der Mittelwerte, Integrale in den drei Intervallen)

$$\underline{I} = \begin{Bmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$\underline{R}_{\text{diff}} = \begin{Bmatrix} R_{\text{diff}_R} \\ R_{\text{diff}_G} \\ R_{\text{diff}_B} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0.4 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\underline{F} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0.2 \\ 0 \end{Bmatrix} \neq \text{schwarz}$$