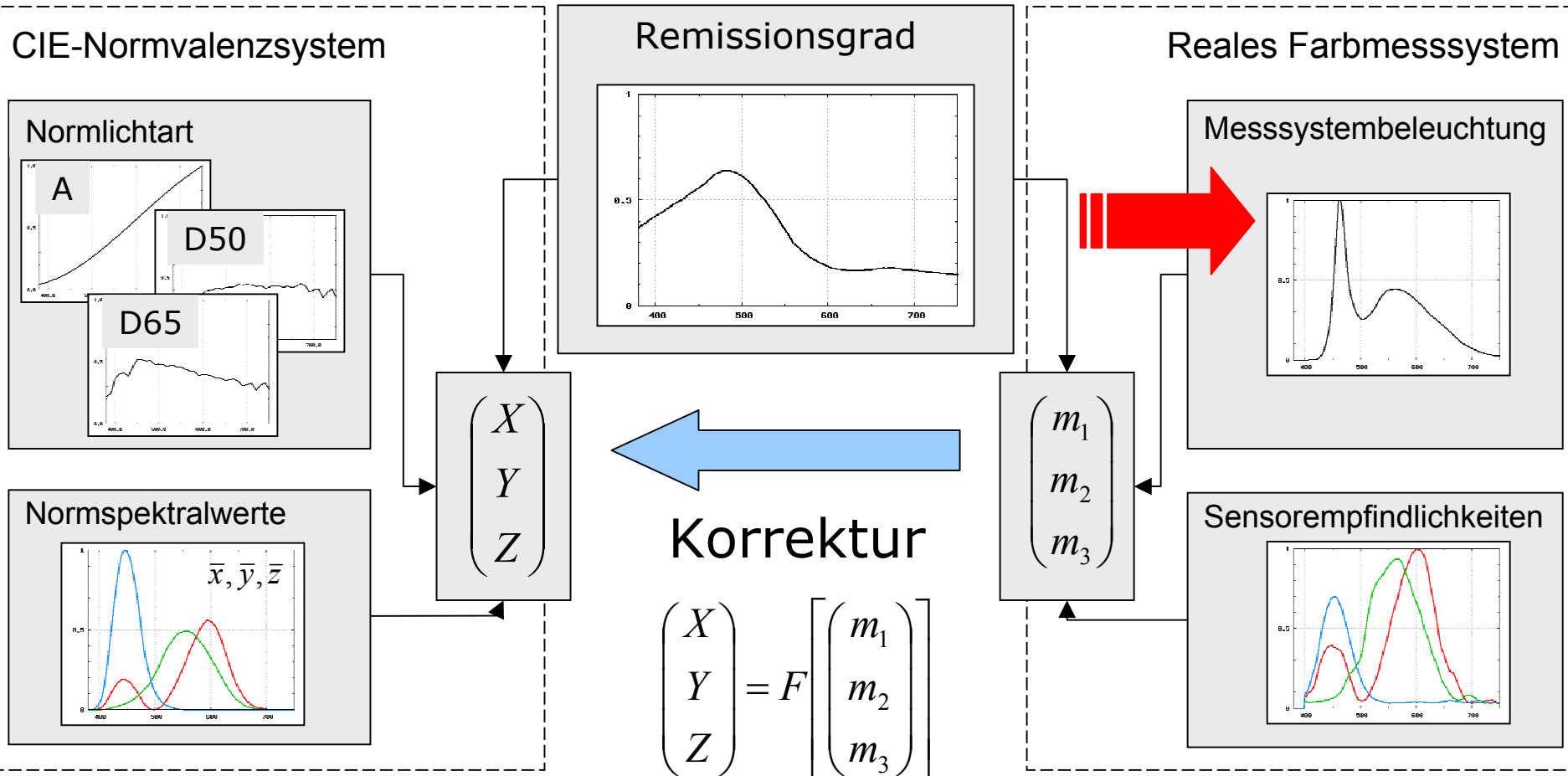


Methodischer Ansatz einer LED-Normlichtquelle für Farbmesssysteme nach dem Dreibereichsverfahren

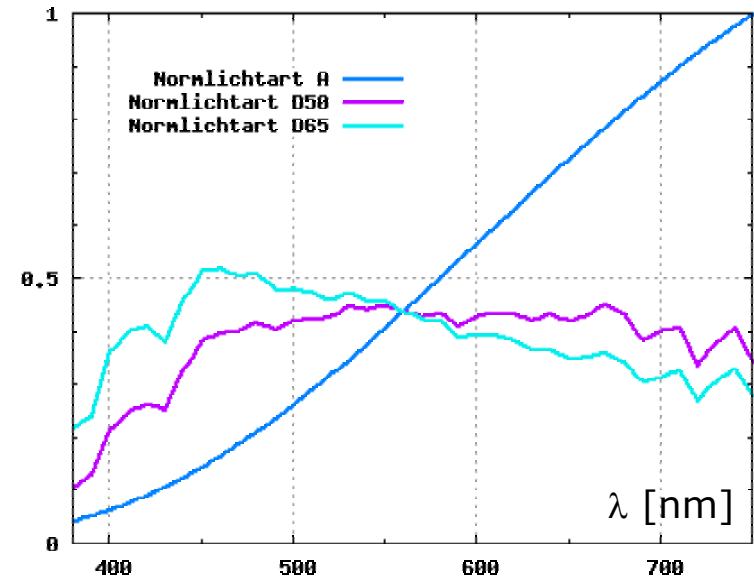
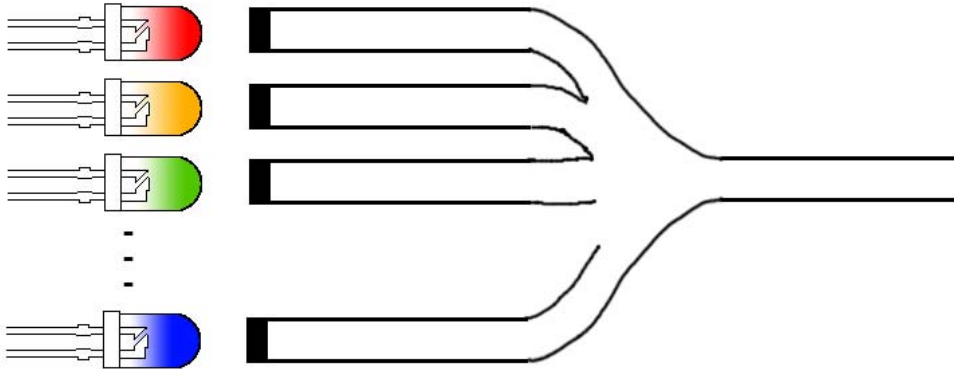
Christian Hufeland¹, Dr. Karl-Heinz Franke^{1,2},
Dr. Rainer Jahn², Rico Nestler²

¹Technische Universität Ilmenau, ²Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.

Farbeigenschaften einer Auflichtfarbprobe sind physikalisch beschrieben durch den **spektralen Remissionsgrad**:



Ziel:
Konstruktion einer LED-Lichtquelle, die mehrere Normlichtarten nachbilden kann.



Ausgangspunkt:
Vorgegebener Satz von Normlichtarten (Zielspektren)

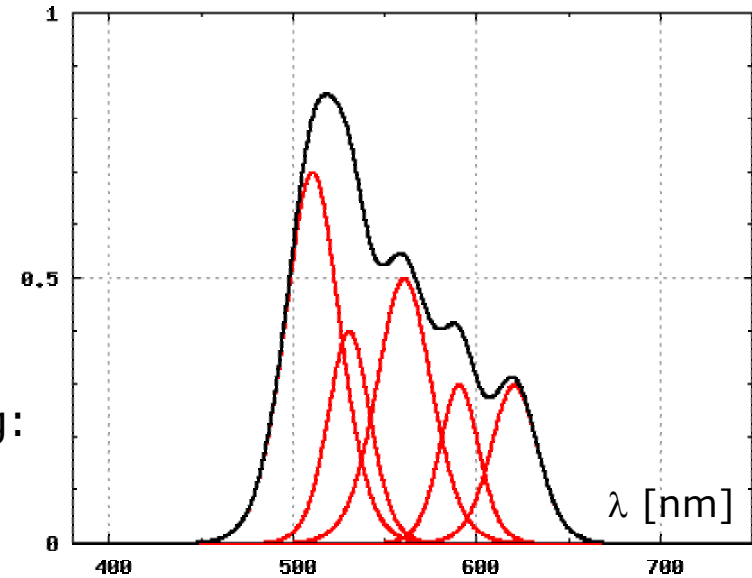
Aufgabe:
Finden einer (möglichst kleinen) Auswahl von Leuchtdioden, die zur Nachbildung der Zielspektren am besten geeignet sind

Gauss-ähnliches Modell für einfarbige LEDs:

$$S_{LED}(\lambda) = e^{-3.2213 \frac{(\lambda - \lambda_{peak})^2}{\Delta\lambda_{0.5}^2} - 0.3 \left| \frac{\lambda - \lambda_{peak}}{\Delta\lambda_{0.5}} \right|}$$

Gesamtspektrum durch additive Überlagerung:

$$S_{Gesamt}(\lambda) = \sum_{i=1}^s h_i \cdot S_{LED}^{(i)}(\lambda)$$

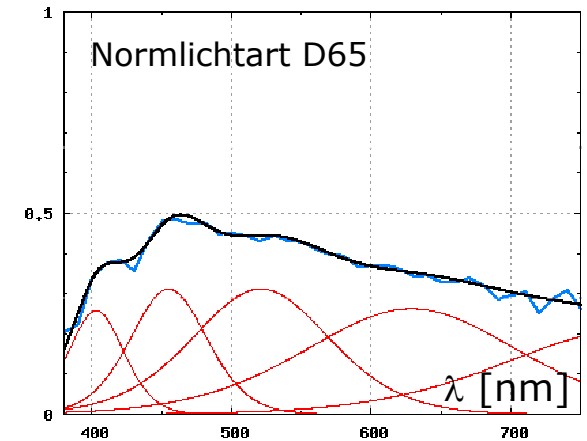
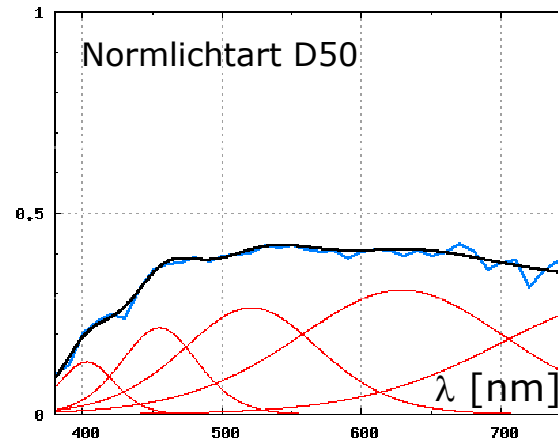
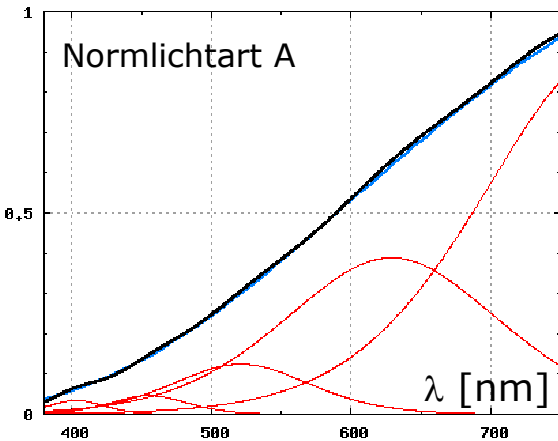


Minimierung des Abstands zu den vorgegebenen Zielspektren:

$$\sum_{j=1}^l \left\| S_{Gesamt}^{(j)}(\lambda) - S_{Ziel}^{(j)}(\lambda) \right\|^2 \rightarrow \min$$

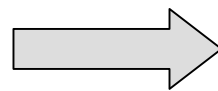
Benutzung numerischer Standardverfahren (*Marquardt-Levenberg-Algorithmus*)

Ergebnis bei Minimierung des euklidischen Spektrenabstandes (5 LED-Modelle):



Optimierte Modell-LEDs:

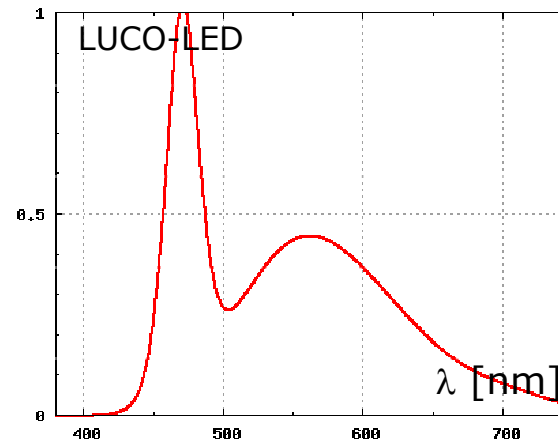
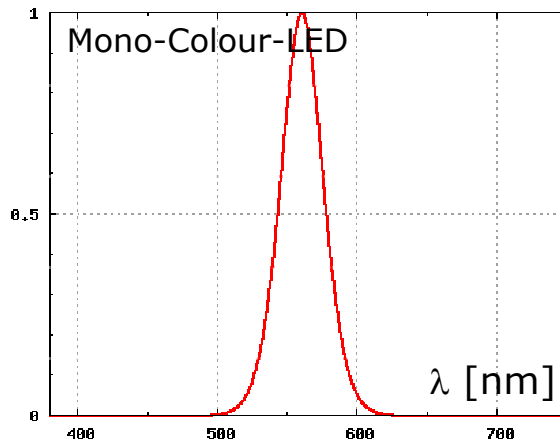
λ_{Peak} [nm]	$\Delta\lambda_{0.5}$ [nm]
403	47
456	66
522	117
630	182
785	215



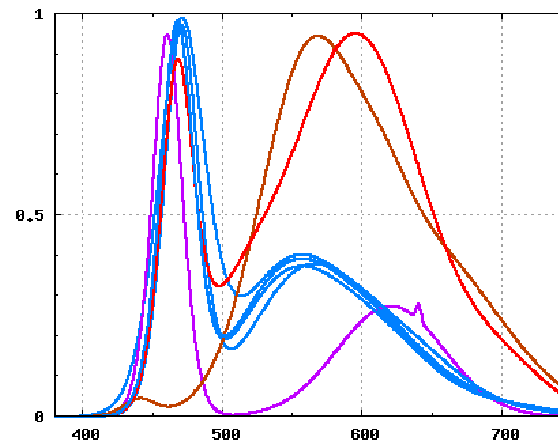
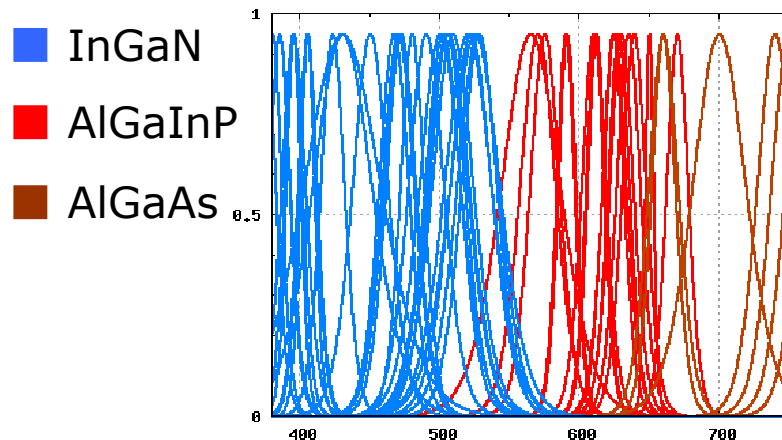
Praktikablerer Ansatz:

Benutze nur diejenigen Spektren, die auch in realen Leuchtdioden verfügbar sind.

Ausgangspunkt: Datenbank mit den Kennzahlen verfügbarer LEDs
Speicherung der Parameter zur Repräsentation verschiedener Typen:



Erfassung des Angebots mehrerer Anbieter (5mm-Bauweise):



- cool white
- warm white
- yellow
- magenta

Diskretes LED-Selektionsproblem:

Eingabe:

Datenbank $D = \{\underline{\phi}_1, \dots, \underline{\phi}_m\} \subseteq R^n$

LED-Anzahl $s \in N$

Zielspektren $\underline{\tau}_1, \dots, \underline{\tau}_l \in R^n$

Optimierungsproblem:

Suche s-elementige Teilmenge D' von D

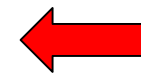
$$D' = \{\underline{\phi}_{i_1}, \dots, \underline{\phi}_{i_s}\} \subseteq D, |D'| = s$$

für die gilt: das Optimalitätskriterium $\varepsilon^*(D')$ entsprechend

$$\varepsilon^*(D') := \min_{h_{11}, \dots, h_{ls}} \sum_{k=1}^l \left\| \underline{\tau}_k - \sum_{j=1}^s h_{kj} \cdot \underline{\phi}_{i_j} \right\|_2^2$$

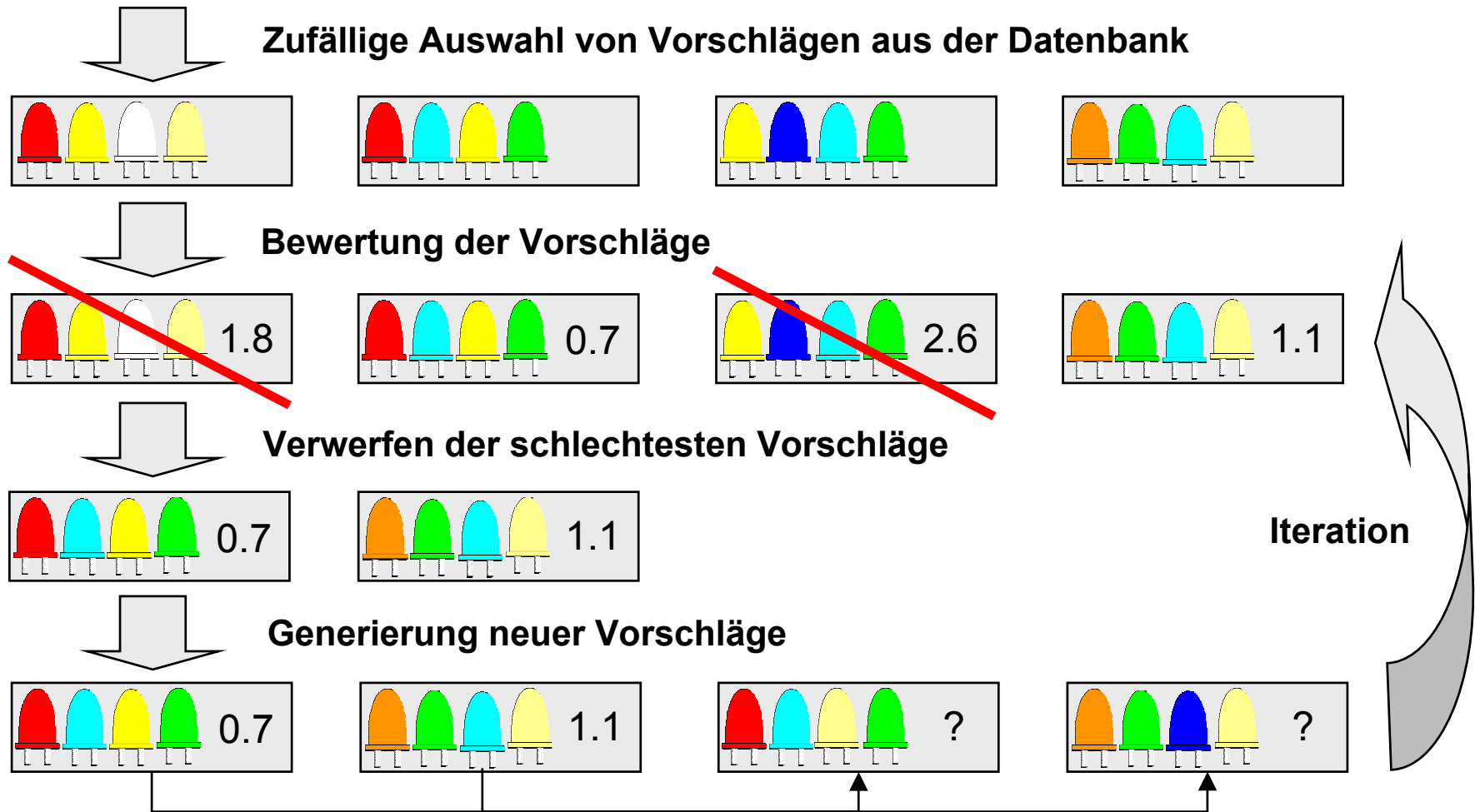
ist minimal unter allen D' .

$$D^* := \arg \min_{D' \subseteq D, |D'|=s} \varepsilon^*(D')$$



Dieses Suchproblem ist **NP-äquivalent**

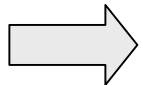
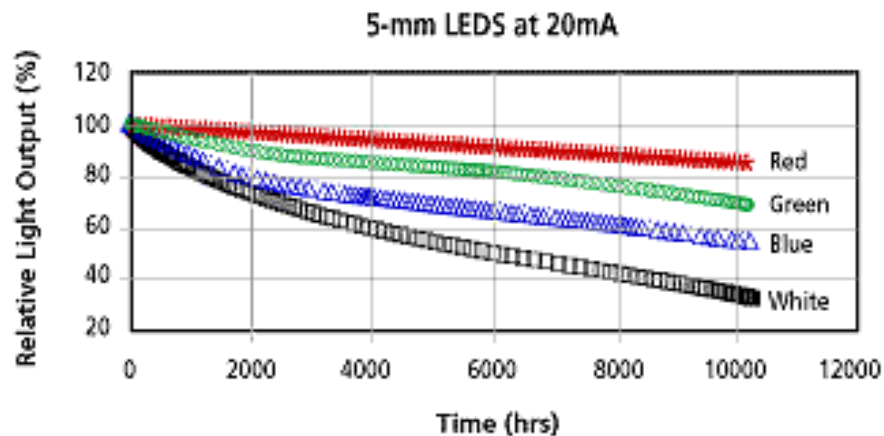
Heuristik: evolutionäres LED-Auswahlverfahren



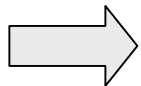
Toleranzeinflüsse und Nachregelung 1

LED-Spektren hängen von verschiedenen Faktoren ab:

1. produktionsbedingte Bauteilschwankungen
2. temperaturbedingte Schwankungen
3. Alterungserscheinungen

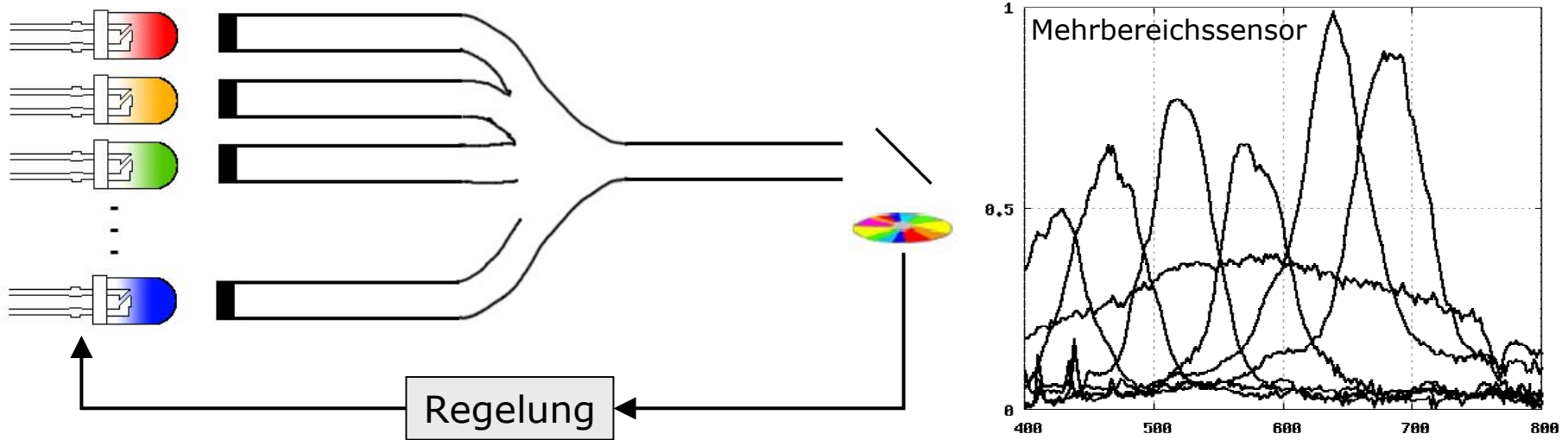


Wesentlicher Toleranzfaktor ist die Helligkeit jeder Leuchtdiode

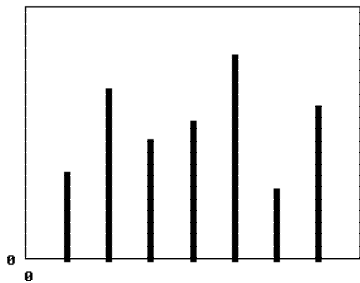


Intensitätsschwankungen könnten nachgeregelt werden

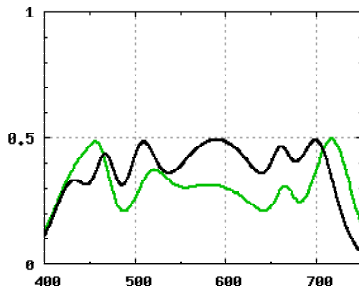
Überwachung des Gesamtspektrums mit einem Mehrbereichssensor



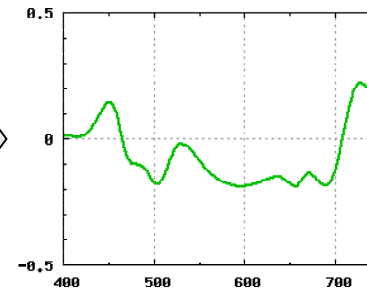
Integrale Messwerte



quasi-spektrale
Rekonstruktion



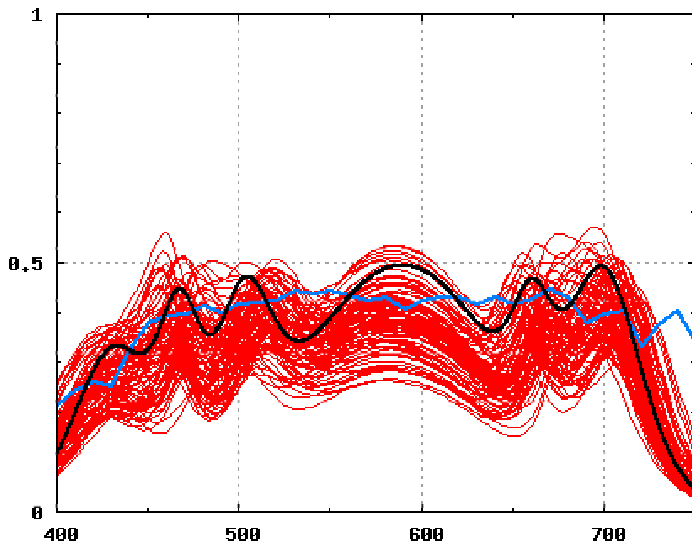
Differenzspektrum



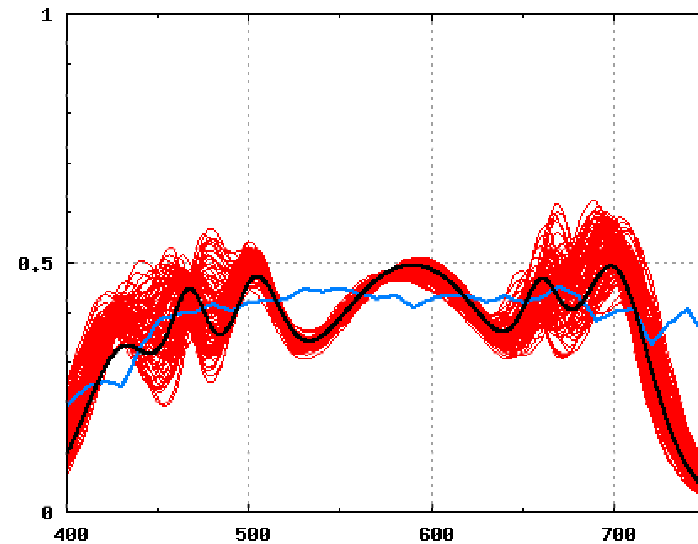
Korrektur der
LED-Intensitäten

Simulation der Korrektur:

Simulierte Schwankungen:



Nach (simulierter) Korrektur:



Zufällige Parametervariationen:

$$0.6 \cdot \Phi_e^{(soll)} \leq \Phi_e^{(ist)} \leq 1.1 \cdot \Phi_e^{(soll)}$$

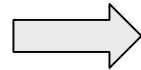
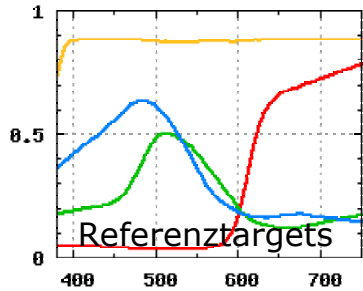
$$\lambda_{Peak} \pm 10nm$$

$$\Delta\lambda_{0.5} \pm 30\%$$

$$0^\circ C \leq T \leq 100^\circ C$$

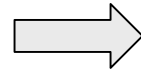
$$k \pm 15\% \text{ (Mischungsverhältnis bei LUCO-LEDs)}$$

Simulierte Kalibrierung eines Dreibereichsfarbmesssystems:



Korrekturmatrix

$$\underline{\underline{K}} \in R^{3 \times 3}$$



$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \underline{\underline{K}} \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

Simulierte Korrekturgüte über 1169 Munsell-Farb-Targets:

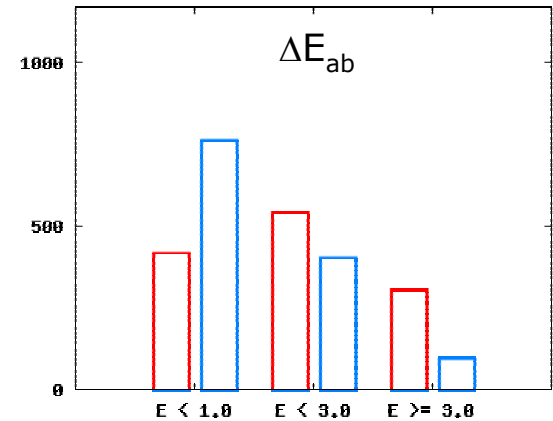
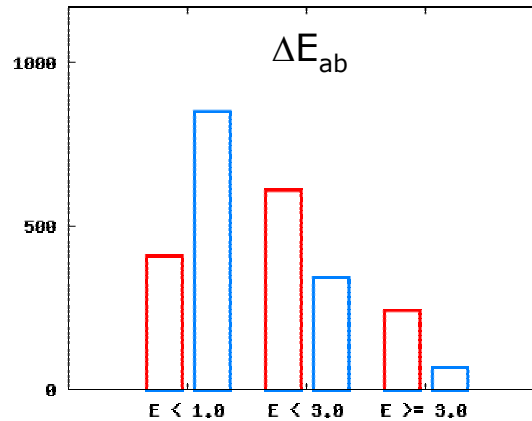
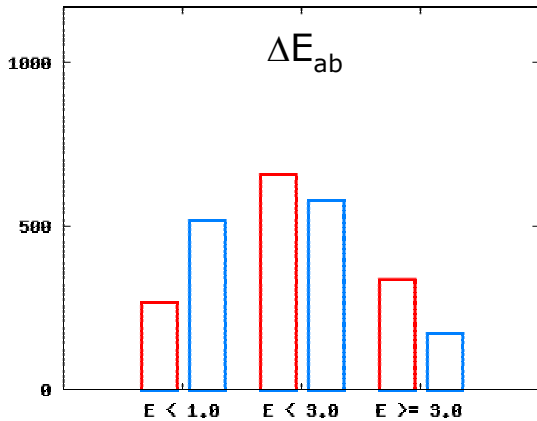
■ Weißlicht-LED-Beleuchtung

■ 6-LED-Normlichtquelle

Normlichtart A

Normlichtart D50

Normlichtart D65



■ $\varnothing \Delta E_{ab} = 2.46$

■ $\varnothing \Delta E_{ab} = 1.52$

■ $\varnothing \Delta E_{ab} = 1.92$

■ $\varnothing \Delta E_{ab} = 0.88$

■ $\varnothing \Delta E_{ab} = 2.15$

■ $\varnothing \Delta E_{ab} = 0.87$

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!