

3 Modulationskonzepte

Im Folgenden soll das Problem der Gradation bei dem bisher eingesetzten Modulationsverfahren OM (Original-Modulation) mit fester Modulationsamplitude $A_U = A_V = 9$ für die Chrominanzsignale U und V und die Blockgröße $B_x = B_y = 4$ (siehe Abschnitt 2.7.4) genauer analysiert werden, um Lösungsziele zu definieren und daraus neue Ansätze zu entwickeln und vorzustellen. Nach Untersuchung dieser und Bewertung der Vor- und Nachteile erfolgt eine begründete Auswahl geeigneter, weiter zu erprobender Maßnahmen.

3.1 Motivation und Problemanalyse

Wie im Abschnitt 2.7.4 ausgeführt, wird aktuell die zeit-differentielle, separate Modulation von U und V um vorgegebene konstante Amplituden A_U und A_V eingesetzt (OM), da das Verfahren verglichen mit der Luminanz- oder der örtlich-differentiellen Modulation am wenigsten störend empfunden wird und gleichzeitig eine einfache Implementierung, relativ robuste Detektion und dank Multiplex beider Kanäle einen Vorteil für die Datenrate bietet. Nichtideale Umstände in der Praxis verschlechtern allerdings die Leistungsfähigkeit des Systems – z. B. Kamerarauschen und Umgebungshelligkeit. So weisen Monitore zur Wiedergabe des modulierten Bildsignals eine nichtlineare Gradationskennlinie auf, die in Abschnitt 2.5 und nachfolgend allgemein durch $f(X)$ mit den gammakorrigierten Größen¹ $X = R', G'$ oder B' beschrieben ist.

Die Aussteuerung des unmodulierten Arbeitspunkts X_0 um $\pm dX_{\pm}$ wird nicht in symmetrische Leuchtdichteänderungen umgesetzt, sondern in positive Richtung ($f(X_{0+}) = f(X_0 + dX_+)$) stärker als in negative ($f(X_{0-}) = f(X_0 - dX_-)$):

$$\widetilde{dX_+} = f(X_{0+}) - f(X_0) \geq \widetilde{dX_-} = f(X_0) - f(X_{0-}) \quad (3.1)$$

Bei hohen Werten (Fall A) verstärkt die größere Steilheit der Kurve in Abb. 3.1² folglich die wiedergabeseitige Signalaussteuerung, bei niedrigeren Werten (Fall B) reduziert sie diese.

Verglichen mit der idealen, d. h. linearen Bildreproduktion macht sich Fall A in der Praxis als stärkeres Rauschen bzw. Flimmern in gesättigten oder hellen Pixeln für den Betrachter störend bemerkbar - je nachdem, ob ein, zwei oder alle drei Farbvalenzen hohe Werte annehmen. Die größere Kontrastsensitivität in Rottönen (vgl. Abschnitt 2.3.5) lässt die Datenmodulation dort

¹ Auf die Kennzeichnung R' etc. wird im Weiteren außer zur Hervorhebung verzichtet

² zu Veranschaulichung mit einer übertriebenen Amplitude von 40

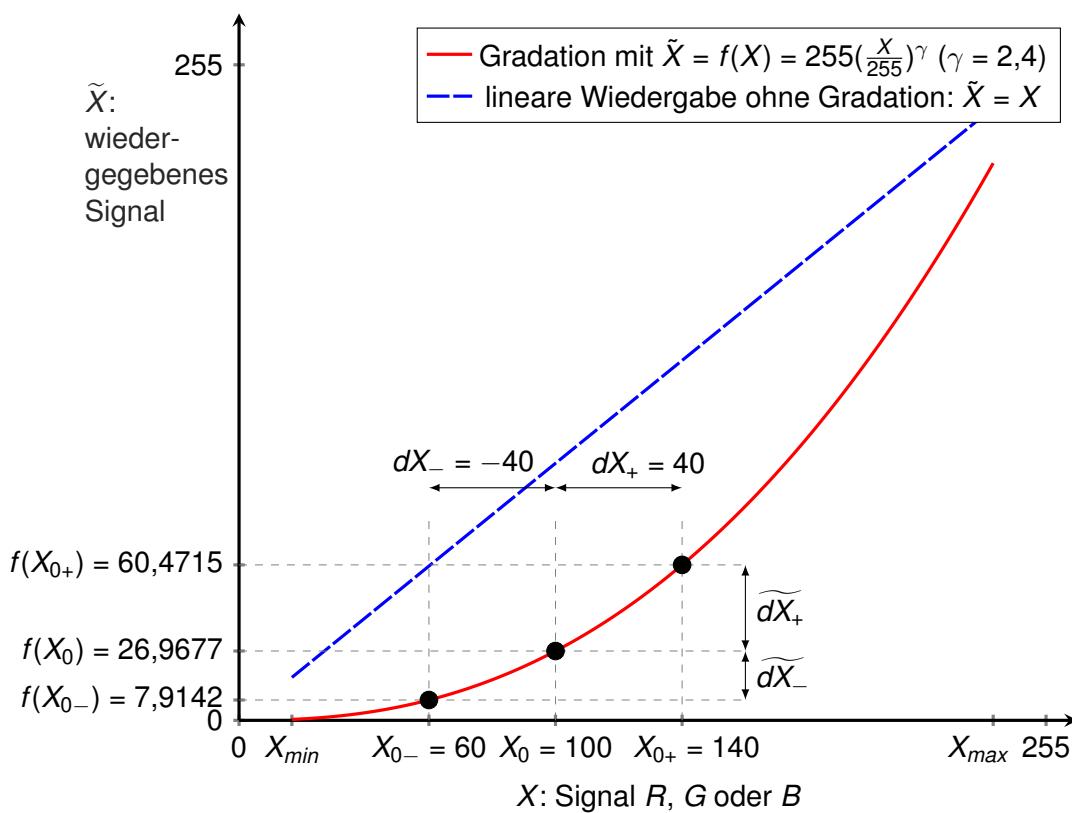


Abbildung 3.1: Modulation bei Gradation

besonders sichtbar werden. Fall B entspricht dunkleren Bildbereichen. Hier entstehen kleinere Signaldifferenzen am Empfänger, womit der SNR sinkt und die Detektion erschwert wird.

Wie Abschnitt 2.5.5 bereits vorwegnimmt, ruft die nichtlineare Wiedergabe nach der Farbraumtransformation und Modulation einen Fehler $\Delta \tilde{Y}$ in der Luminanz \tilde{Y} gegenüber dem unverzerrten Signal hervor. So wird neben den Chrominanzen U und V auch die Luminanz \tilde{Y}^3 modifiziert:

$$\Delta \tilde{Y} = \tilde{Y}_{mod} - \tilde{Y}_0 \quad (3.2)$$

$$= K_R f(R + dR) + K_G f(G + dG) + K_B f(B + dB) - K_R f(R) + K_G f(G) + K_B f(B) \quad (3.3)$$

Dies wäre nicht der Fall, wenn die Modulation auf die wieder linearisierten Ausgangssignale $X = f(X')$ ($X = R, B$ oder G) anstatt auf die vorverzerrten Eingangsgrößen $X' = f^{-1}(X)$ wirken

³ siehe Gleichung (2.10) für die Berechnung

würde⁴. Die Modulation und die Gradation müssten also die Reihenfolge tauschen:

$$\begin{aligned}
 f(\tilde{\underline{g}}) &= \begin{bmatrix} \tilde{R} \\ \tilde{G} \\ \tilde{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(R_{mod}) \\ f(G_{mod}) \\ f(B_{mod}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(R' + dR) \\ f(G' + dG) \\ f(B' + dB) \end{bmatrix} \\
 &\neq \begin{bmatrix} f(R') + dR \\ f(G') + dG \\ f(B') + dB \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(f^{-1}(R)) + dR \\ f(f^{-1}(G)) + dG \\ f(f^{-1}(B)) + dB \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + dR \\ G + dG \\ B + dB \end{bmatrix} = \underline{g}_{mod}
 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Wie Abb. 3.2a für $f(X) = X^{2,2}$ und $A = 9$ als Flächen gleicher Luminanzunterschiede ΔY darstellt, ist der Fehler bei extremen, ungleichen Verhältnissen zwischen R und G zu verorten⁵, derweil die Amplitudenvorzeichen die Abhängigkeit von B und die Gesamtpolarität festlegen. Ebenfalls kann der Farbabstand im CIELAB-Raum nach Gleichung (2.32) untersucht werden⁶. Auch in Abb. 3.2b zeigen sich die größten Abweichungen im Fall hoher R - und B -Werte bei gleichen Vorzeichen für U und V , gefolgt vom Fall verschiedener Vorzeichen für hohe G -Werte.

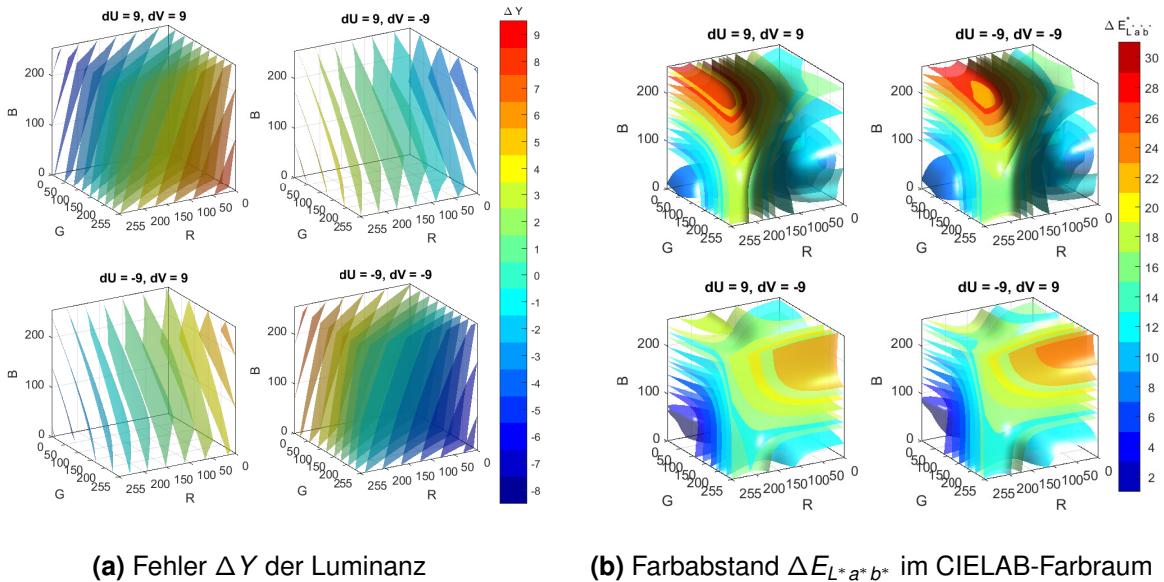


Abbildung 3.2: Isoflächen der Wiedergabefehler durch die Gradation im Vergleich nach der OM und ohne Modulation

⁴ die Beziehung ist gültig, sofern die Gammaverzerrung und -korrektur aufeinander abgestimmt sind

⁵ entspricht den Ecken links und rechts in den Abbildungen

⁶ Die modulierten Werte nach Gradation $f(X_{mod})$ und die unmodulierten $f(X)$ für $X = R, G$ oder B sind nach CIELAB zu transformieren und einzusetzen

3.2 Entwicklung und Beschreibung neuer Modulationskonzepte

Ausgehend von festgelegten Zielen im nachfolgenden Abschnitt 3.2.1 werden durch sinnvolle Ausnutzung theoretischer Grundlagen und Beziehungen mathematische Modell-Beschreibungen für optimierte Modulationskonzepte ausgearbeitet.

3.2.1 Ziele und Qualitätskriterien

Im Kapitel Abschnitt 3.1 wird dargelegt, dass die nichtlineare Wiedergabe des modulierten Signals hauptsächlich störenden Einfluss auf die subjektive Bildqualität für den Betrachter und die Detektion am Kamerasystem haben müsste.

Neue Verfahren sollen primär die Sichtbarkeit der Datenmodulation minimieren und gleichzeitig möglichst die Detektierbarkeit verbessern. Allerdings stehen die Ziele im Konflikt zueinander, weil der Modulationsgrad beides erhöht. Die folgende Übersicht erläutert die Ziele, stellt Qualitätskriterien zusammen und nennt Ansätze, aus denen sich weitere Methoden entwickeln lassen:

geringe Sichtbarkeit:

- idealerweise Wahrnehmung des unmodulierten Originalvideos bzw. -signals \tilde{X}_0 nach Wiedergabe
- konstante Helligkeit trotz Modulation (reine Chrominanzmodulation):

$$\tilde{L}_0 = \tilde{L}_{mod} \quad (3.5)$$

⇒ Ansatz für GA (Grünausgleich, vgl. Abschnitt 3.3)

- korrekte Wiedergabe im zeitlichen Mittel durch additive Mischung bei ausreichender Frequenz und symmetrischer Aussteuerung:

$$\tilde{\bar{X}}^t = \tilde{X}_0 \quad (3.6)$$

⇒ Ansatz für die AC (Amplitudenkorrektur, vgl. Abschnitt 3.4)

- Ausnutzung der begrenzten menschlichen Wahrnehmung
- ⇒ chromatische Modulation, z. B. von: Blau, U und V oder a^* und b^* (⇒ $L^*a^*b^*$ -Modulation, Abschnitt 3.9)
- gute subjektive Bewertung der Bildqualität (s. Kapitel 6)

gute Detektierbarkeit:

- ausreichende Signaldifferenzen Δ am Empfänger (vgl. Abschnitt 2.7.4 zur Demodulation und Differenzbilder in Kapitel 5)
- bzw. ausreichende Signalaussteuerungen nach der Wiedergabe:

$$\tilde{dX} = \tilde{X} - \tilde{X}_0 \quad (3.7)$$

- genügend SNR für R und B
 - besonders in dunklen Bildbereichen
- ⇒ Anhebung der Modulationsamplitude für kleine Signale ⇒ LD (lineare Dämpfung)

- korrekte Wiedergabe vorgegebener Modulationsamplituden $dX_0 = dR_0$, dG_0 und dB_0 ⇒ AC:

$$\tilde{dX} = dX_0 \quad (3.8)$$

- geringe BER (bit error rate) und klare Trennung an den Entscheidungsschwellen im Konstellationsdiagramm (vgl. Kapitel 5)

3.3 Grünausgleich (GA)

Für den GA soll eine **konstante Helligkeit unabhängig von der Modulation**, aber unter Mitbeachtung der Gradation vorausgesetzt werden. Präziser formuliert soll die empfundene Helligkeit \tilde{L}_0 nach der nichtlinearen Wiedergabe durch den Bildschirm dem Wert \tilde{L}_{mod} für das vorher amplitudenmodulierte Bildsignal entsprechen. In die Ausgangsgleichung 3.5 als Zielvorgabe kann die Luminanz Y gemäß BT.709 stellvertretend für die Helligkeit eingesetzt werden, um Gleichheit herzustellen.

$$\tilde{Y}_0 = \tilde{Y}_{mod} \quad (3.9)$$

Die Funktion

$$f(X) = \tilde{X} = X^\gamma, \quad \gamma \approx 2,2 \dots 2,4 \quad \text{und} \quad X \in [0 \dots 1] \quad (3.10)$$

beschreibe die nichtlineare Monitor-Kennlinie für $X = R, G$ oder B (vgl. Abschnitt 2.5). Vorgegebene Modulationsamplituden dU und dV für U und V lassen sich mit der Matrix aus Gleichung (2.14) in äquivalente Werte für RGB umwandeln und umgekehrt (siehe Gleichung (2.70)):

$$\begin{bmatrix} dR \\ dG \\ dB \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ dU \\ dV \end{bmatrix} \quad \text{mit: } T = T_{Y'UV \rightarrow RGB, BT.709} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1,575 \\ 1 & -0,187 & -0,468 \\ 1 & 1,856 & 0 \end{bmatrix}$$

Da der bisherige Demodulationsansatz primär die Differenzen des R - und B -Signals auswertet, bietet sich als freier Parameter die Modulationsamplitude dG des Grünkanals an, um die Abweichung der Helligkeit nach der Gradation auszugleichen. Damit sollte die Kompatibilität zum Detektionsverfahren weitgehend unbeeinflusst bleiben. Außerdem ist nur eine geringe Anpassung erforderlich, da der Beitrag von Grün zur Helligkeit am größten ist. Einsetzen oben genannter Beziehungen und Auflösen der Gleichung 3.9 führt zur angepassten vorzeichenbehafteten Amplitude:

$$\tilde{Y}_0 = \tilde{Y}_{mod} \quad (3.11)$$

$$K_R f(R_0 + dR) + K_G f(G_0 + dG) + K_B f(B_0 + dB) = K_R f(R_0) + K_G f(G_0) + K_B f(B_0) \quad (3.12)$$

$$f(G_0 + dG) = \frac{1}{K_G} \left(\tilde{Y}_0 - K_R f(R_0 + dR) - K_B f(B_0 + dB) \right)$$

$$\Rightarrow dG = f^{-1} \left(\frac{1}{K_G} \left(\tilde{Y}_0 - K_R f(R_0 + dR) - K_B f(B_0 + dB) \right) \right) - G_0 \quad (3.13)$$

Problematisch erweisen sich dunkle Bildbereiche, zumal das menschliche Auge dort am empfindlichsten auf Helligkeitsstörungen reagiert. Bei kleinen Werten für B und gleichzeitig positiven Modulationsamplituden für R und B kann Grün teilweise nicht ausreichend gegensteuern ohne in den negativen Bereich gelangen (siehe Abschnitt 3.5).

3.4 Amplituden-Korrektur (AC)

Im zweiten vorgeschlagenen Ansatz – der AC (Amplitude Correction) – soll der Gradationseinfluss auf die Modulationsamplituden des gesamten RGB-Tripels beseitigt werden. Wie Abschnitt 3.1 ausführt, liegt bei relativ geringen Signalen der Arbeitspunkt im flachen Bereich der Transfer-Kennlinie, sodass die Amplitude dort verringert wiedergegeben wird, während bei hohen Signalen die größere Steilheit für eine Verstärkung sorgt.

Vorgegeben werden im Folgenden die Original-Amplituden dU_0 und dV_0 bzw. dR_0 , dG_0 und dB_0 oder allgemein dX_0 auf der Wiedergabeseite (vgl. Gleichung (3.8)), wie sie ohne Gra-

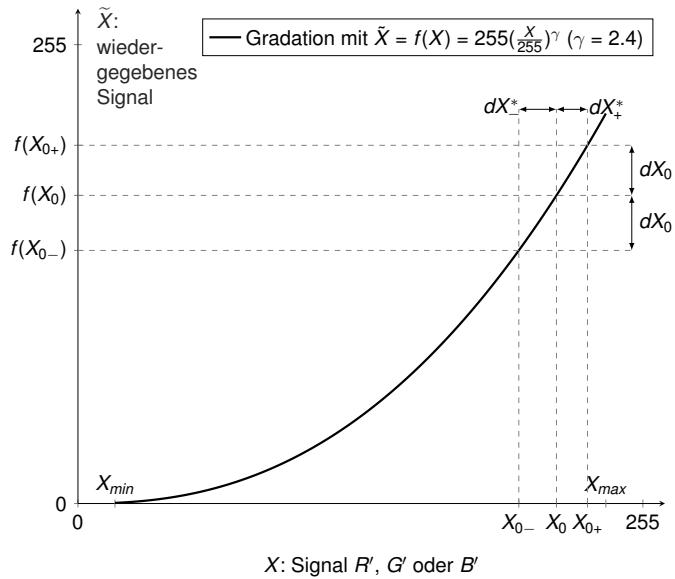


Abbildung 3.3: Veranschaulichung der Amplitudenkorrektur

tion zu erwarten wären. Es soll für die dortige Amplitude nach Gleichung (3.7) bezüglich der Ausgangsbasis \tilde{X}_0 gelten:

$$\tilde{X} = \tilde{X} - \tilde{X}_0 \quad (3.7)$$

$$= dX_0 \quad (3.8)$$

Anders ausgedrückt wird die Reihenfolge von Gradation und Modulation umgekehrt: Das angepasste modulierte Signal $X_{mod}^* = X_0 + dX^*$ soll nach der Wiedergabe dem ebenfalls nichtlinear dargestellten Original-Signal $\tilde{X}_0 = f(X_0)$ mit nachfolgender Modulation um dX_0 entsprechen, also:

$$\Leftrightarrow \quad f(X_0 + dX^*) = f(X_0) + dX_0 \quad (3.14)$$

Die Inversion der Gradation ergibt das um die neue Modulations-Amplitude dX^* korrigierte Video-Signal X_{mod}^* :

$$X_{mod}^* = X_0 + dX^* = f^{-1}(f(X_0) + dX_0) \quad (3.15)$$

Die Graphen in Abb. 3.4 stellen die Verläufe des korrigierten modulierten Signals X_{mod}^* , der neuen Amplitude dX^* und zum Vergleich der Vorgabe dX_0 aufgetragen über die Signale R , G bzw. B auf der x-Achse dar. Die Kreuze markieren Schnittpunkte der alten und neuen Amplituden. Die Begrenzung bei Null ist an dem Abknicken für dX^* bzw. X_{mod}^* zu erkennen.

Zum gleichen Ergebnis kommt die Betrachtung, eine Modulation für das zu reproduzierende Originalbild durchzuführen, indem die gammavorverzerrten Eingangs-Signale $X' = R'$, G' und B' auf die linearen R , G und B zurückgerechnet, diese moduliert und gamma-korrigiert

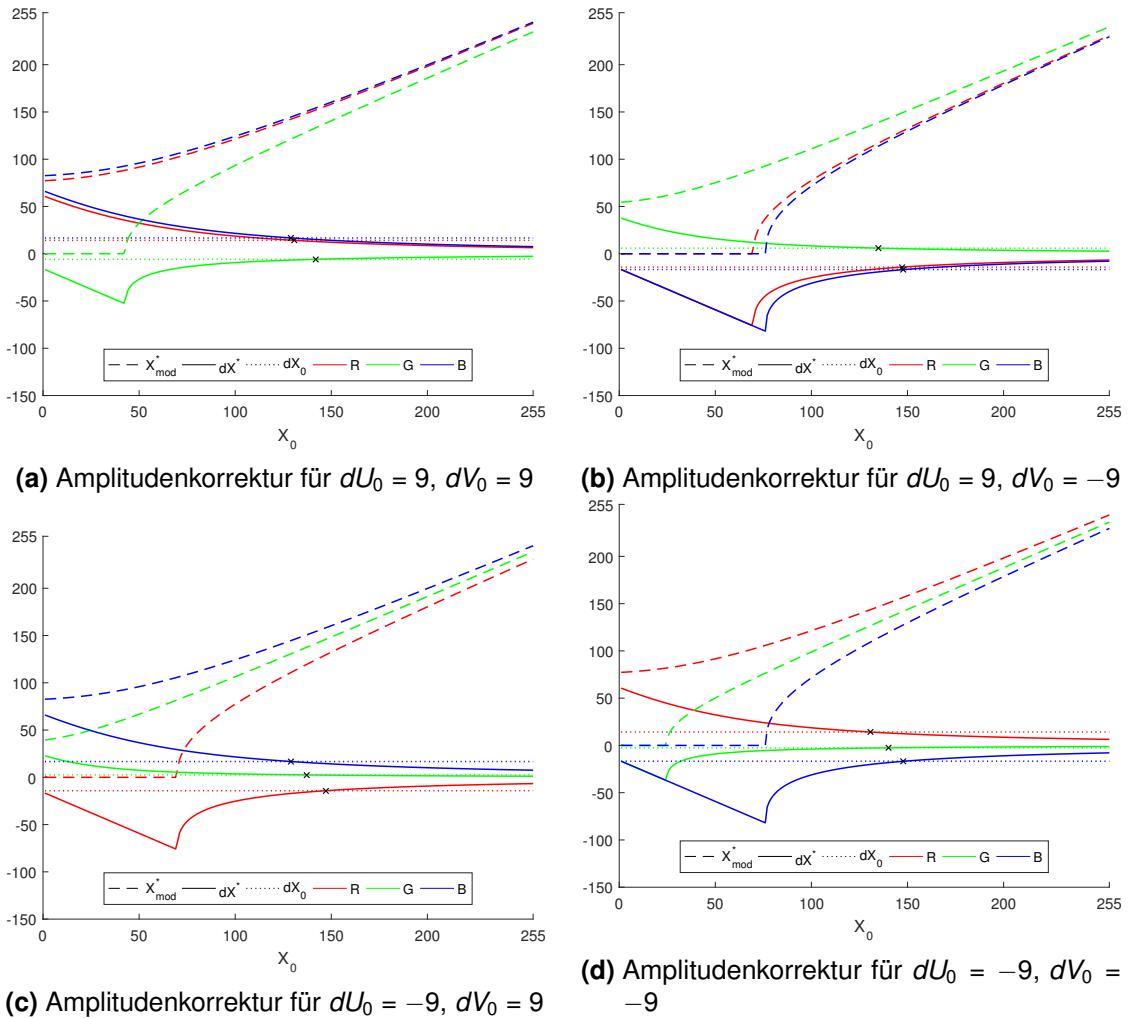


Abbildung 3.4: Verläufe von X_{mod}^* und dX^* nach Amplitudenkorrektur verglichen mit der Vorgabe dX_0 für R, G und B; Die Kreuze markieren Schnittpunkte der alten und neuen Amplituden

werden:

$$\begin{aligned}
 X' &= X^{\frac{1}{\gamma}} & \Leftrightarrow X &= (X')^\gamma \\
 X_{mod} &= (X')^\gamma + dX_0 \\
 X_{mod}^* &= [X_{mod}]' = \left((X')^\gamma + dX_0 \right)^{\frac{1}{\gamma}}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Die Berechnung ist für alle Primärvalenzen durchzuführen.

Vorteile des Verfahrens sind im günstigsten Fall neben der Beseitigung oben genannter Probleme

- die Helligkeitskonstanz, da alleine die Chrominanzen U und V , nicht aber die Luminanz Y moduliert werden, sowie

- eine symmetrische Aussteuerung in positive wie negative Richtung, die im zeitlichen Mittel bei hohen Frequenzen durch additive Mischung im menschlichen Auge näherungsweise das unmodulierte Ausgangssignal ergeben sollte (siehe Gleichung (3.6)):

$$\tilde{X}^t = \overline{f(X_0 + dX^*)}^t \quad (3.17)$$

$$= \frac{f(X_0) + |dX_0| + f(X_0) - |dX_0|}{2} = f(X_0) \quad (3.18)$$

Für kleine Signalwerte X_0 kann der Ausdruck $f(X_0) + \tilde{dX} < 0$ in Gleichung (3.14) negativ werden (siehe Abb. 3.5), sodass die Inversion im Schritt von Gleichung (3.14) auf Gleichung (3.15) und damit eine Realisierung der vorgegebenen negativen Modulationsamplitude \tilde{dX}_0 verhindert würde (vgl. Problem beim GA Abschnitt 3.3). Die vorzunehmende Begrenzung ist an dem Abknicken für dX^* bzw. X_{mod}^* Abb. 3.4 zu erkennen.

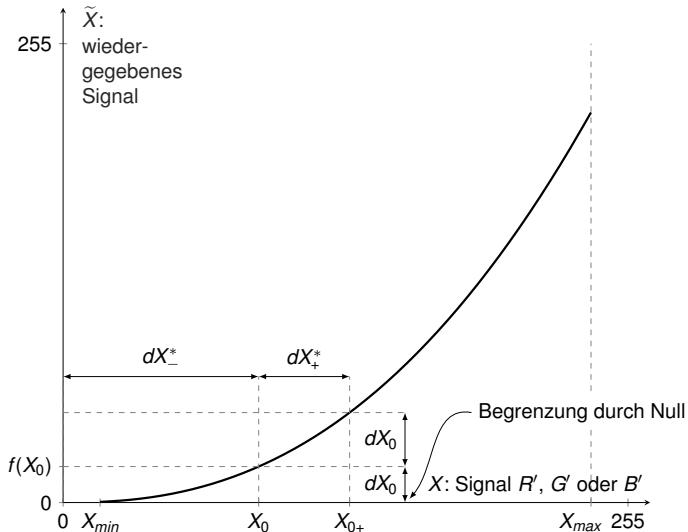


Abbildung 3.5: Begrenzung bei der Amplitudenkorrektur

Gleichzeitig nimmt die modifizierte positive Amplitude einen überproportional hohen Wert an. Diese Ungleichmäßigkeit ist bei einer einfachen Signalbegrenzung auf $X_{mod}^* = 0$ (siehe Begrenzung Abschnitt 3.5) in dunklen Bereichen als Farbfehler und deutlicheres Rauschen zu sehen.

3.5 Signalbegrenzung

Der Definitionsbereich von $X \in [0 \dots 255]$ oder bei Normierung $[0 \dots 1]$ für die Signale $X = R, G, B, Y, U$, oder V begrenzt die realisierbaren Modulationsamplituden. Werte über die Pegel

hinaus werden abgeschnitten (engl. *clipping*):

$$X = \begin{cases} 0 & X_{mod} < 0 \\ 255 & X_{mod} > 255 \end{cases} \quad (3.19)$$

3.5.1 Aussteuerungsreserven

Um das Clipping zu verhindern, wurden im Originalverfahren Reserven (engl. *headroom* und *footroom*) in Größe der maximal anzunehmenden Modulationsamplitude eingeführt:

$$X_{min} = \max(|dR|; |dG|; |dB|) \quad (3.20)$$

Mit $A_U = A_V = 9$ ohne Betrachtung der Gradation:

$$X_{min} \approx \max(14,2; 4,2; 16,7) = 16,7 \quad (3.21)$$

Die Skalierung auf den neuen Wertebereich erfolgt mittels der Transformation

$$h: D_X = [0 \dots 255] \rightarrow D_{X_0} = [X_{min} \dots X_{max}] \quad X_{max} = 255 - X_{min} \quad (3.22)$$

$$h(X) = X \cdot \left(\frac{255 - X_{min} - X_{max}}{255} \right) + X_{min} = X \cdot \left(\frac{255 - 2 \cdot X_{min}}{255} \right) + X_{min}$$

Effektiv wird dadurch der Kontrastumfang und die Sättigung des Originalbildes verringert. Soll für die Amplitudenkorrektur bei Gradation genügend Freiraum garantiert werden, kann mit der Forderung

$$f(X_0) \geq \widetilde{dX} \quad (3.23)$$

die untere Grenze angegeben werden:

$$X_{min} = f^{-1}(\widetilde{dX}) \quad (3.24)$$

Für die maximale Amplitude $dX = \max(|dR|; |dG|; |dB|) \approx 16,7$ und $1/\gamma \approx 0,45$ ergäbe sich näherungsweise:

$$X_{min} = 255 \cdot \left(\frac{16,7}{255} \right)^{0,45} \approx 74 \quad (3.25)$$

Den Freiraum derart zu erweitern, stellt jedoch keine tolerierbare Lösung dar, weil die Bildqualität zu sehr gemindert würde. Auch eine separate Betrachtung der einzelnen Kanäle und des oberen und unteren Randes ist nicht anwendbar, da im asymmetrischen Fall $R_{min} \neq G_{min} \neq B_{min}$ Farbfehler bei Grauwerten entstünden.

3.6 Bildabhängige Modulation

Um die Vorteile der verschiedenen Modulationskonzepte für den jeweiligen Bildbereich optimal zu vereinen oder aber die erläuterten Probleme wie *clipping* (siehe Abschnitt 3.5) zu vermeiden, können für deren Anwendung Konditionen abhängig vom Bildinhalt eingeführt werden, z. B. Schwellenwerte, die erfüllt sein müssen.

3.6.1 Schwellenwert-Amplitudenlimitierung (AL)

So kann ein Schwellenwert (engl. *threshold*) X_{th} für den Signalpegel definiert werden, ab dem erst die hier vorgestellten Verfahren (X_{mod}^*) die erhöhte wiedergegebene Modulationsamplitude und damit verbundene Sichtbarkeit verringern sollen. Andernfalls soll beispielsweise auf die Original-Modulation ($X_{mod,0}$) begrenzt werden (AL), um die sonst problematischen, übermäßigen Modulationen bei Korrektur dunkler Bereiche zu minimieren:

$$X_{mod} = \begin{cases} X_{mod,0} = X_0 + dX_0 & \text{falls } X < X_{th} \\ X_{mod}^* & \text{falls } X \geq X_{th} \end{cases} \quad (3.26)$$

Besonders für R , wo das genannte Problem bei Sättigung am deutlichsten ist, verspricht diese einfach zu implementierende Maßnahme gute Ergebnisse. Aber auch die logische Verknüpfung der Konditionen bietet gezieltere Justierungen. Sinnvoll erscheint unter anderem die Begrenzung für alle drei RGB-Werte in Abhängigkeit von R bzgl. der Schwelle R_{th} .

Auch die UND-Verknüpfung der drei Bedingungen $X < X_{th}$ für R , G und B zusammen ist praktisch nutzbar, um zielgerichtet dunkle Pixel auszuwählen und dort einer übersteuerten Korrektur oder den in Abschnitten 3.3 und 3.4 erläuterten Farbfehlern entgegenzuwirken.

3.6.2 Übergang

Vor allem bei der Darstellung von Farbgradienten wird die potentielle Unstetigkeit in Gleichung (3.26) als abrupte Störung wahrgenommen. Daher sollte ein weicher Übergang konziert werden. Im einfachsten Fall wird eine lineare Verbindungsgerade zwischen dem originalen und dem neuen modulierten Wert definiert (siehe dazu Abb. 3.6). Bei der Begrenzung aller Farbvalenzen zusammen (s. o.) sind die Variablen zu unterscheiden zwischen:

- denjenigen (Y), die geprüft, und
- solchen (X), die daraufhin begrenzt werden sollen.

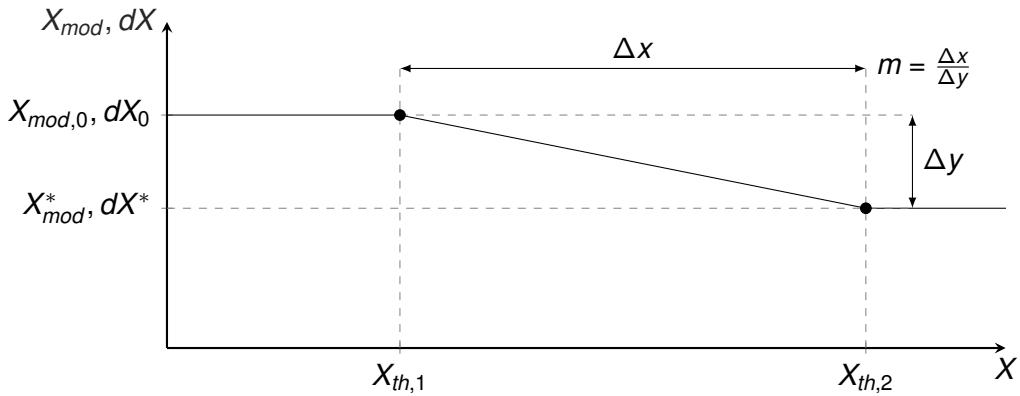


Abbildung 3.6: linearer Übergang des modulierten Signals X_{mod} bzw. der Modulationsamplitude dX

$$X_{mod} = \begin{cases} X_{mod,0} & \text{falls } Y < Y_{th,1} \\ X_{mod,0} + m \cdot (Y - Y_{th,1}); & \text{falls } Y_{th,1} \leq Y < Y_{th,2} \\ X_{mod}^* & \text{falls } Y \geq Y_{th,2} \end{cases} \quad (3.27)$$

mit der Steigung:

$$m = \frac{X_{mod}^* - X_{mod,0}}{Y_{th,2} - Y_{th,1}} \quad (3.28)$$

In den oben zuletzt genannten Fällen sind R bzw. $\max(R, G, B)$ für Y sowie jeweils R , G und B für X einzusetzen.

3.6.3 Wertabhängige Amplitudenlimitierung (AL)

Um auffällige Korrekturen in dunklen Bildpunkten zu verhindern, eignet sich auch eine wertabhängige Limitierung der Modulationsamplitude (AL) an, beispielsweise auf die Konstante dX_0 :

$$dX = \begin{cases} dX^* & \text{falls } |dX^*| > dX_0 \\ dX_0 & \text{falls } |dX^*| \leq dX_0 \end{cases} \quad (3.29)$$

3.7 Lineare Dämpfung LD

Erfahrungsgemäß wirkt sich die Gradation bei hohen Signalpegeln stärker negativ aus. Um dem Effekt hoher Aussteuerungen in den Kanälen R und B und folglich sichtbarer Bildverschlechterungen entgegenzuwirken, kann die Modulationsamplitude dX im Sinne einer Dämpfung als fallende Funktion des Signals $X = R$ oder B modelliert werden, z. B. in der simpelsten Umsetzung wie in Abb. 3.7a als Konstante mit der Anfangsamplitude dX_0 bis zu dem Wert

X_m und danach als abknickende Geradenfunktion der negativen Steigung $-m$ und maximalen Absenkung um a_{max} :

$$dX(X) = \begin{cases} dX_0, & 0 \leq X \leq X_m \\ dX_0(1 - m \cdot (X - X_m)), & X_m < X \leq 1 \end{cases} \quad (3.30)$$

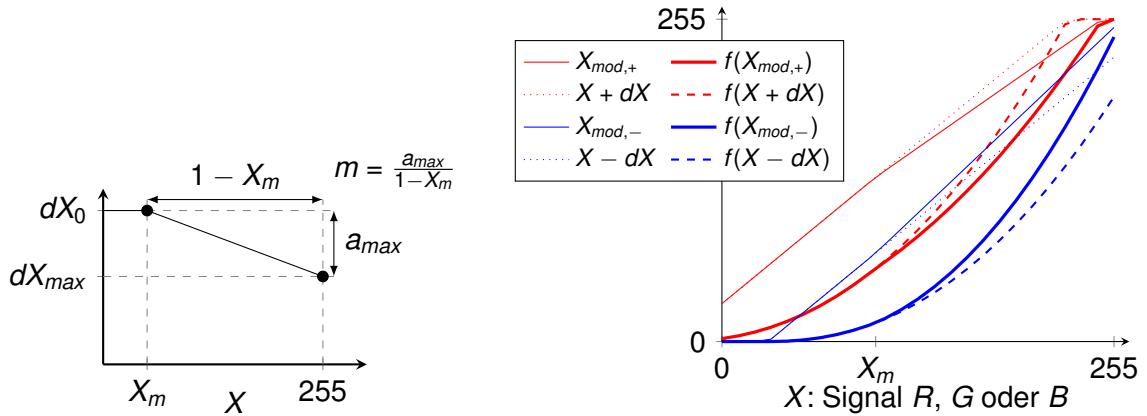
$$\text{mit: } \begin{aligned} dX(X=1) &= dX_0(1 - m \cdot (1 - X_m)) \\ &= dX_0(1 - a_{max}) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\Leftrightarrow m = \frac{a_{max}}{1 - X_m} \quad (3.32)$$

Für $X_m = 0$ lässt sich das modulierte Signal X_{mod} wie folgt berechnen:

$$X_{mod} = X + dX_0(1 - a_{max} \cdot X) \quad (3.33)$$

Abbildung 3.7b stellt X_{mod} verglichen mit der Original-Modulation dar.



(a) lineare Dämpfung der Modulationsamplitude dX

(b) lineare Dämpfung ($X_{mod,\pm}$) und normale Modulation ($X \pm dX$) für positive und negative Amplituden im Vergleich bei Gammaverzerrung mit der Funktion $f(X) = 255(X/255)^2$

Die AL (siehe Abschnitt 3.6.3) und die LD sind vergleichbar mit üblichen Praktiken der Audio-Signalverarbeitung zur Dynamikreduktion: Der Limitierung (*limiting* oder *clipping*) und der Kompression (*compression*). In beiden Fällen werden hohe Signalpegel z. B. ab einem gewissen Schwellenwert (*threshold*) reduziert, um übersteuerte Signalspitzen zu vermeiden. *Compression* definiert für die Absenkung ein Verhältnis (*ratio*; vergleichbar mit a_{max}), welches beim *Limiter* als Extremform theoretisch unendlich wäre. Kompressoren können zusätzlich niedrige Signale und damit den SNR anheben - hier umsetzbar durch eine lineare Fortsetzung der Geraden für $X < X_m$ statt der Begrenzung auf die Konstante dX_0 [99].

3.8 Mischung

Die bisher vorgestellten Verfahren mit ihren Stärken und Schwächen können für einen optimalen Ansatz miteinander kombiniert oder anteilig gemischt werden.

3.8.1 Partielle Amplitudenkorrektur (PAC)

Anstatt die Modulationsamplitude $\tilde{d}X = dX_0$ nach gammaverzerrender Wiedergabe komplett wie in Abschnitt 3.4 ausgeführt zu korrigieren, kann auch erwogen werden, nur einen Teil $\alpha \in [0 \dots 1]$ der neu ermittelten Amplitude dX^* zu verwenden.

$$dX = \alpha dX^* + (1 - \alpha) dX_0 \quad (3.34)$$

Diese PAC (Partial Amplitude Correction) reduziert Bildfehler und stellt einen Kompromiss zwischen einem Ausgleich der Nichtlinearität und verhältnismäßiger Sichtbarkeit her.

3.8.2 Zusätzlicher Grünausgleich

Nach der PAC kann ein zusätzlicher Grünausgleich GA (siehe Abschnitt 3.3) den restlichen Fehler in der Luminanz nach der Gradation kompensieren. Dieser Ansatz kombiniert somit beide Methoden.

3.9 Modulation in CIELAB (L*a*b*-M.)

Die Chrominanz erweist sich aufgrund der geringeren menschlichen Sensitivität für Farbunterschiede und dem Angebot zweier separater Kanäle als ideal für die versteckte Datenmodulation. Diesbezüglich gestattet der perzeptuell uniforme CIELAB-Farbraum eine der menschlichen Farbwahrnehmung stärker entgegenkommende Modellbetrachtung als YUV. So wird bei CIELAB unter anderem die unterschiedliche sensitive Rezeption von Rot-Grün- gegenüber Blau-Gelb-Farbtönen berücksichtigt. Da auch die Gradationskurve eine vergleichbare Charakteristik wie die Helligkeitswahrnehmung besitzt (siehe Abschnitt 2.5.3 und Abb. 2.22), lässt sich die Gammaverzerrung teilweise korrigieren.

An dieser Stelle soll die Modulation der Dimensionen a^* und b^* untersucht werden. Folgende Schritte sind für die L*a*b*-Modulation notwendig:

1. Linearisierung des RGB-Farbraums: Unter der Annahme, dass der Bildschirm sRGB einsetzt, erfolgt die Umrechnung mittels Gleichung (2.57) jeweils für $V' = R', G', B'$ zu $L = R, G, B$
2. Transformation der linearen RGB-Werte nach XYZ: Die Matrix für sRGB und den Weißpunkt D65 lautet nach Gleichung (2.7) und Tabelle 2.1:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

3. Normierung von XYZ auf den 2° -Normalbeobachter und D65 (siehe Tabelle 2.2) mit Gleichung (2.24):

$$x_n = \frac{X}{X_n} \quad X_n = \frac{x_n}{y_n} = 0,95047 \quad (3.36)$$

$$y_n = \frac{Y}{Y_n} \quad Y_n = 1 \quad (3.37)$$

$$z_n = \frac{Z}{Z_n} \quad Z_n = \frac{1 - x_n - y_n}{y_n} = 0,08883 \quad (3.38)$$

4. Transformation von XYZ nach $L^*a^*b^*$ mithilfe Gleichung (2.17) und Gleichung (2.22)
5. Modulation mit den Amplituden d_{a^*} und d_{b^*} :

$$a_{mod}^* = a^* + d_{a^*} \quad (3.39)$$

$$b_{mod}^* = b^* + d_{b^*} \quad (3.40)$$

6. Rücktransformation zu XYZ mit Gleichung (2.25)
7. Entnormierung mit Gleichung (2.29)
8. Transformation von XYZ nach RGB:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2404542 & 1,5371385 & 0,4985314 \\ 0,9692660 & 1,8760108 & 0,0415560 \\ 0,0556434 & 0,2040259 & 1,0572252 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

9. Umwandlung der linearen RGB-Werte in gammakorrigierte, nichtlineare sRGB-Werte mit Gleichung (2.56)

Um äquivalente Modulationsamplituden zu $A = A_U = A_V$ zu finden, wird der gesamte Signalraum für $R, G, B \in [0 \dots 255]$ in U und V moduliert, nach CIELAB transformiert und dort zum korrespondierenden unmodulierten CIELAB-Wert die Betragsdifferenz gebildet. Für $A = 9$ lässt sich aus den resultierenden Mittelwerten in Tabelle 3.1 die angenäherte Amplitude $d_{a^*} = d_{b^*} = 12$ festlegen.

Tabelle 3.1: arithmetische Mittelwerte der Betragsdifferenzen im CIELAB-Farbraum nach Modulation in U und V um die Amplitude $A = 9$ für die vier möglichen Vorzeichenkonstellationen und der Mittelwert daraus

	$d_U =$ +9	-9	+9	-9	Mittelwert:
	$d_V =$ +9	-9	-9	+9	
L^* :	22,8163	22,1408	22,3774	22,5325	22,4668
a^* :	11,5545	14,0201	10,4774	10,2766	11,5822
b^* :	12,9753	11,6577	13,8027	11,5349	12,4926

Abschnitt 5.1.1 beweist allerdings, dass die originale Demodulationsmethode für U und V die Daten nicht mehr decodieren kann, sondern an die neuen Verhältnisse für a^* und b^* angepasst werden muss.

3.10 Übersicht

Die nachstehende Tabelle fasst die Konzeptvorschläge der letzten Kapitel zusammen – zuerst Modulationsmethoden zum Gradationsausgleich, anschließend subsidiäre Justierungen des Dynamikumfangs:

Tabelle 3.2: Übersicht neuer Modulationskonzepte

Konzept	Ziel und Ansatz	Vorteil	Nachteil
Grünausgleich (GA)	konstante Helligkeit durch die angepasste Modulation von G	<ul style="list-style-type: none"> Helligkeitskonstanz bietet geringe Sichtbarkeit einfache Implementierung Detektion anhand R und B unbeeinflusst 	<ul style="list-style-type: none"> Fehler in dunklen Bereichen

Tabelle 3.2: Übersicht neuer Modulationskonzepte

Konzept	Ziel und Ansatz	Vorteil	Nachteil
Amplitudenkorrektur (AC)	Wiedergabe vorgegebener Amplituden nach Korrektur	<ul style="list-style-type: none"> • bessere Detektierbarkeit • robuster in dunklen Bereichen • konstante Helligkeit • geringere Sichtbarkeit in gesättigten Farben 	<ul style="list-style-type: none"> • Farbfehler und erhöhtes Rauschen in dunklen Bereichen
lineare Dämpfung (LD)	Absenkung der Modulationsamplitude für große Signalpegel	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Berechnung • Verringerung starker Aussteuerungen • Anhebung für bessere Detektion möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • keine mathematisch hergeleitete, sondern empirische Korrektur • eventuell verringerte Detektierbarkeit bei hohen Signalwerten
L*a*b*-Modulation	Modulation in CIELAB von a^* und b^*	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Sichtbarkeit durch Chromianzmodulation • Anpassung an die menschliche Wahrnehmung 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Rechenaufwand • inkompatibel zum originalen Decodier-Verfahren
Justierungen des Dynamikumfangs:			
Clipping	Signalbeschränkung auf den Definitionsreich	<ul style="list-style-type: none"> • einfachste Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler für extreme Signalpegel • Farbfehler aufgrund asymmetrischer Aussteuerung
Reserve	Größere Aussteuerungsreserven	<ul style="list-style-type: none"> • besser detektierbare Amplituden für kleine Signale möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Kontrastumfang • starke Entfärbung

Tabelle 3.2: Übersicht neuer Modulationskonzepte

Konzept	Ziel und Ansatz	Vorteil	Nachteil
Bildabhängigkeit	Wahl des Verfahrens abhängig vom Bild	<ul style="list-style-type: none"> • weitere Optimierungsmöglichkeiten • Ausnutzen verschiedener Stärken • gezielte Problemminimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexerer Kontrollfluss
Schwellenwert-AL	Verwendung des modifizierten Verfahrens erst über gewissem Pegel	<ul style="list-style-type: none"> • mögliche Korrektur zu stark wiedergegebener Amplituden 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Optimierung in dunklen Bereichen • Unstetigkeit
Übergang	Unstetigkeiten bei Verfahrenswechseln vermeiden	<ul style="list-style-type: none"> • siehe Schwellenwert 	<ul style="list-style-type: none"> • größerer Rechenaufwand
werte-abhängige AL	Begrenzung der Modulationsamplitude auf gewissen Wert	<ul style="list-style-type: none"> • Verhinderung überhöht wiedergegebener Amplituden 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Verbesserung der Detektion
Mischung (PAC)	(anteilige) Kombination verschiedener Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierungsmöglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • verringerte Effektivität

3.11 Auswahl der Modulationsmethoden

Unter Berücksichtigung der analysierten Eigenschaften aller vorangehenden Konzeptentwürfe und nach ersten visuellen Erprobungen qualifizieren sich folgende Modulationsmethoden für die weitere praktische Implementierung und Prüfung:

1. Original-Modulation (OM) mit Amplitude $A = 9$ (s. Abschnitt 2.7.4)
2. Grünausgleich (GA; s. Abschnitt 3.3)
3. Amplitudenkorrektur (AC; s. Abschnitt 3.4)
4. Mischung (s. Abschnitt 3.8) mit Anteil $\alpha = 50\%$ und zusätzlichem GA
5. Dämpfung (LD; s. Abschnitt 3.7) mit maximaler Dämpfung $a_{max} = 30\%$
6. L*a*b*-Modulation (s. Abschnitt 3.9) mit $A_{a^*} = A_{b^*} = 12$

Für die Punkte 2 bis 5 wird eine Amplitudenbegrenzung (AL; s. Abschnitt 3.6.1) in dunklen Bildpunkten eingesetzt mit:

- Anfangsamplitude $A_0 = 9$
- Schwellenwert-Bedingung für die normierten Eingangssignale $X \in [0,1]$: R , G und $B < 0,3$
- linearem Übergang: bis R , G oder $B > 0,6$

Allgemein wird

- eine Gradation mit dem Exponenten $\gamma = 2,2$ angenommen,
- die Blockgröße $B_x = B_y = 4$ und
- der Modulationsgrad $A = 9$ verwendet.

4 Implementierung

Die bisherigen theoretischen Überlegungen wurden in die reale Testumgebung integriert. Die nächsten Abschnitte sollen die Umsetzung in den einzelnen Systemkomponenten des Senders darlegen.

4.1 MATLAB

Das vom Lehrstuhl für Kommunikationstechnik entwickelte Programm „ofs_interactive.m“ in MATLAB ermöglicht zu Testzwecken die Wiedergabe eines modulierten Videos auf einem angeschlossenen Monitor. Die Frames der auswählbaren Videodatei werden sequentiell an den CUDA-Server (siehe Abschnitt 4.2) zur Modulation mit konfigurierbaren Parametern weitergeleitet und dann abgespielt.

Der MATLAB-Code wurde für die neuen Methoden erweitert:

1. um weitere Parameter zum Einstellen der Modulationsmethode sowie der Begrenzungen und Schwellenwerte, die beim CUDA-Funktionsaufruf mit überreicht werden, und
2. um eine tastaturgesteuerte Auswahl sowie Bildschirmausgabe dieser Werte.

4.2 CUDA

CUDA ist eine von NVIDIA (2007) entwickelte Computerarchitektur und API (application programming interface) für GPU-Berechnungen mit einer C ähnlichen Programmiersprache. Die parallele Bearbeitung ähnlicher Rechenaufgaben auf mehreren ALUs (arithmetic logic units), die zu Blöcken und einem Kern gruppiert sind, erhöht die Geschwindigkeit [100], [101]. Aus diesem Grund wird die pixelweise Modulation mittels CUDA auf der Grafikkarte vorgenommen.

4.2.1 Code der neuen Modulationsverfahren

Der neu implementierte Abschnitt in der CUDA-Funktion „modulate_image_Chrominance“ soll anhand des auszugsweisen Quellcodes in Listing B.1 kurz erklärt werden.

Nach Auswahl der Pixel im Block, einer optionalen örtlichen Filterung und Berechnung der originalen Modulation erfolgt eine Fallunterscheidung anhand des Parameters `modMode` für die neuen Methoden.

Bei dem Wert 2 für die AC oder auch 3 für die Mischung werden die RGB-Signale entsprechend Gleichung (3.15) ab Zeile 15 zuerst gammaverzerrt (mittels der Potenzfunktion `pow`), moduliert und auf positive Werte durch die Funktion `max` begrenzt (Zeile 19 ff.) und zuletzt wieder gammakorrigiert mit dem Kehrwert von γ im Exponenten. Die Mischung erfolgt analog zu Gleichung (3.34) mit `newModMix` als α (Zeile 28 ff.).

Die lineare Dämpfung (`modMode` 4) für R und B ist in den Zeilen 33 bis 40 für $X_m = 0$ mit einer fakultativen Signalbegrenzung auf 0 ... 1 umgesetzt.

Im Grunausgleich für `modMode` 1 (ab Zeile 42) wird gemäß Gleichung (3.13) die Luminanz nach Gradation berechnet (Zeilen 43 bis 47) und davon werden die modulierten und gammaverzerrten Anteile `Rmod2` und `Bmod2` subtrahiert (Zeile 51). Der Zwischenwert muss auf 0 begrenzt werden (Zeile 52), um negative Werte in der nachfolgenden inversen Potenzfunktion und andernfalls falsche Ergebnisse auszuschließen.

Für `modMode` 5 erfolgt ab Zeile 55 die Modulation in CIELAB entsprechend der Schritte in Abschnitt 3.9.

Im Anschluss werden die Modulationskonditionen bei Amplitudenlimitierung oder anderen Signalbegrenzungen überprüft und angewendet. Verschiedene Parameter, Schwellenwerte und Verknüpfungen sowie lineare Übergänge sind implementiert. Schließlich werden die RGB-Werte ausgegeben.

4.3 Modulierte Einzelbilder

Verschiedene Modulationsmethoden wurden auf Testbilder angewendet, um die Programm-funktionalität zu prüfen und sinnvolle Parameter zu ermitteln. Exemplarische Ergebnisse sind in Abb. 4.1 und Anhang C zu sehen – jeweils ein beidseitig moduliertes Paar (links) und die Differenz daraus (rechts). Letztere ist auf einen mittleren Grauton angehoben und veranschaulicht die Modulationsamplituden vor der Wiedergabe.

5 Messungen

Ausgewählte Modulationsverfahren wurden in der realen Testumgebung erprobt. Folgende Geräte kamen zum Einsatz:

Tabelle 5.1: verwendete Geräte

Gerät	Typ	Hersteller
Luminanz-Kolorimeter (Photometer)	BM-5AS	Topcon [103], [104]
Oszilloskop	DSO6032A Oscilloscope: 300 MHz, 2 Analoge Channels	Keysight Technologies ¹ [105], [106]
High-Speed-Kamera	HS-12000C	Emergent Vision Technologies [107], [108]
OLED-Fernseher	LG 55EF950V	LG Electronics [109]
Leuchtdichtemessgerät	LS-100	Konica Minolta [110]
Laser-Entfernungs- messer	GLM 150 Professional	Bosch [111]

5.1 Übertragung und Decodierung

Eine High-Speed-Kamera erfasst im geeigneten Abstand den 3860×2160 Pixel großen Bildschirmausschnitt möglichst formatfüllend mit einer an die Wiedergabe angepassten Framerate von 60 Hz². Das Global-Shutter-Verfahren verhindert zeilenweise Versetzungen im aufgenommenen Bild [112]. Die Software eCapture [113] ermöglicht die Steuerung der Kamera [114]. Die Belichtungszeit (*exposure*) wurde auf $3000 \mu\text{s}$ erhöht, bis das aufgenommene Display-Bild im abgedunkelten Raum gleichmäßig hell erscheint. An einem Test-Schachbrettmuster konnte der Kamerafokus scharfgestellt werden.

Auf dem über ein 10-Gbit/s-Ethernet-Kabel verbundenen PC steuert eine MATLAB-Anwendung vom Lehrstuhl für Kommunikationstechnik die Kameraaufnahme und übernimmt die Decodierung [114]. Nach einer Kantendetektion zur Ermittlung des Bildausschnitts, der Bildpunktterkennung und einer zeitlichen Synchronisation erfolgt die Auswertung der Differenzbilder anhand von Schwellenwerten für den *R*- und *B*-Kanal und schließlich die Rekonstruktion der transmitierten Daten.

¹ ehemals Agilent Technologies

² maximal 84 Hz bei voller Auflösung von 4096×3072 Pixeln [107]

Zusätzlich stellt das Programm mehrere Funktionen zur Auswertung bereit:

- Berechnung der BER: Bei Kenntnis der Original-Daten können die Bitfehler bei der Übertragung gezählt und ins Verhältnis zur Gesamtzahl gesetzt werden. Besonders veränderliche Lichtverhältnisse, die abgespielte Sequenz und die Kameraeinstellungen beeinflussen das Fehlermaß.
- Darstellung der Differenzbilder: Die Differenz für R und B aus dem positiv und negativ moduliertem Bild kann angezeigt werden, indem ein Grauwert 128 addiert wird.
- Darstellung des Konstellationsdiagramms für R und B: Die Differenzsignale aller abgetasteten Pixel (im Abstand der Blockgröße) können in R- und B-Komponente getrennt als Punkte visualisiert werden. Anhand des Abstandes zu den Entscheidungsschwellen, die auf den Achsen durch den Ursprung verlaufen, lässt sich die Fehleranfälligkeit der Decodierung für die beiden Chrominanzen abschätzen.

Anhand der 1920×1080 Pixel großen Testbilder Abb. 5.1a und 5.1b wurden die Modulationsverfahren aus Abschnitt 3.11 evaluiert.



(a) „Dortmund.jpg“



(b) „windmill.png“

Abbildung 5.1: Testbilder zur Übertragung

Zu senden waren neun Frames für eine 210154 Bytes große Bild-Datei als *payload*. Abbildung 5.2 zeigt die Einstellungen der Anwendung und berechneten Details der Übertragung. Auszuwerten ist ein Frame mehr, damit zu Beginn und am Ende ein vollständiges positiv wie auch negativ moduliertes Bildpaar zu Verfügung steht.

5.1.1 Messergebnisse und -auswertung der Übertragung

Die ermittelten BER in Tabelle 5.2 unterscheiden sich je nach Testbild um ca. eine Zehnerpotenz. Die insgesamt deutlich geringere BER beim Bild „windmill.png“ hängt vermutlich mit dem für die Modulation günstigen großflächigen, hellen Himmel zusammen, in dem sich die Signale besser detektieren lassen als in größeren dunkleren Bereichen wie im Bild „Dortmund.jpg“ z. B. unten rechts.

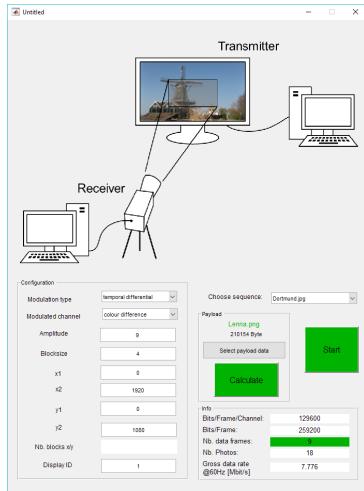


Abbildung 5.2: GUI (graphical user interface) in MATLAB zur Konfiguration der Übertragung

Tabelle 5.2: BER aus zwei Messungen für verschiedene Testsequenzen und Modulationsmethoden mit Mittelwert (MW) und relativen Abweichungen Δ zur OM

Modulation	Bild: „Dortmund.jpg“					
	1. Messung		2. Messung		MW	
	BER	Δ [%]	BER	Δ [%]	BER	Δ [%]
OM	$1,398 \cdot 10^{-3}$	0,00%	$1,399 \cdot 10^{-3}$	0,00%	$1,399 \cdot 10^{-3}$	0,00%
GA	$1,500 \cdot 10^{-3}$	7,28%	$1,600 \cdot 10^{-3}$	14,37%	$1,550 \cdot 10^{-3}$	10,83%
AC	$1,602 \cdot 10^{-3}$	14,56%	$1,600 \cdot 10^{-3}$	14,39%	$1,601 \cdot 10^{-3}$	14,47%
Mischung	$1,400 \cdot 10^{-3}$	0,13%	$1,309 \cdot 10^{-3}$	-6,43%	$1,355 \cdot 10^{-3}$	-3,15%
Dämpfung	$1,500 \cdot 10^{-3}$	7,26%	$1,695 \cdot 10^{-3}$	21,12%	$1,597 \cdot 10^{-3}$	14,19%

Bild: „windmill.png“						
	BER	Δ [%]	BER	Δ [%]	BER	Δ [%]
OM	$1,495 \cdot 10^{-4}$	0,00%	$1,118 \cdot 10^{-4}$	0,00%	$1,307 \cdot 10^{-4}$	0,00%
GA	$1,414 \cdot 10^{-4}$	-5,43%	$1,223 \cdot 10^{-4}$	9,40%	$1,319 \cdot 10^{-4}$	0,91%
AC	$1,648 \cdot 10^{-4}$	10,22%	$1,863 \cdot 10^{-4}$	66,66%	$1,756 \cdot 10^{-4}$	34,37%
Mischung	$1,443 \cdot 10^{-4}$	-3,51%	$1,252 \cdot 10^{-4}$	11,97%	$1,347 \cdot 10^{-4}$	3,11%
Dämpfung	$1,992 \cdot 10^{-4}$	33,23%	$1,562 \cdot 10^{-4}$	39,74%	$1,777 \cdot 10^{-4}$	36,01%

Dagegen ähneln sich die Werte je nach eingesetztem Verfahren und variieren bei den Messungen in verschiedene Richtungen: Die BER sinkt von der 1. zur 2. Messung am Bild „windmill.png“ für alle Methoden bis auf die AC. Vor allem verschiedene Lichtverhältnisse der Testumgebung können einen stärkeren Einfluss auf die Fehlerrate haben. Daher ist die Aussagekraft für die verwendeten Modulationsmethoden zu relativieren. Tendenziell scheinen die neueren Methoden die Decodierung im Vergleich mit der OM einerseits nicht zu erleichtern (nur die Mischung erzielt im Mittel eine BER-Reduzierung um 3,15 %), andererseits aber nicht signifikant zu verschlechtern (die Abweichung der Mittelwerte zur OM beträgt maximal 36,01 % und

variiert stark). Die kleine Datenbasis erlaubt letztlich keine präzise abgeleiteten Aussagen.

Die Decodierung bei der L*a*b*-Modulation verlief ohne Erfolg, weswegen eine BER nicht angegeben ist. Eventuell würden ein größerer Datensatz aus mehreren Messreihen bei möglichst idealen Bedingungen aufschlussreichere Interpretationen bezüglich der Verfahren erlauben.

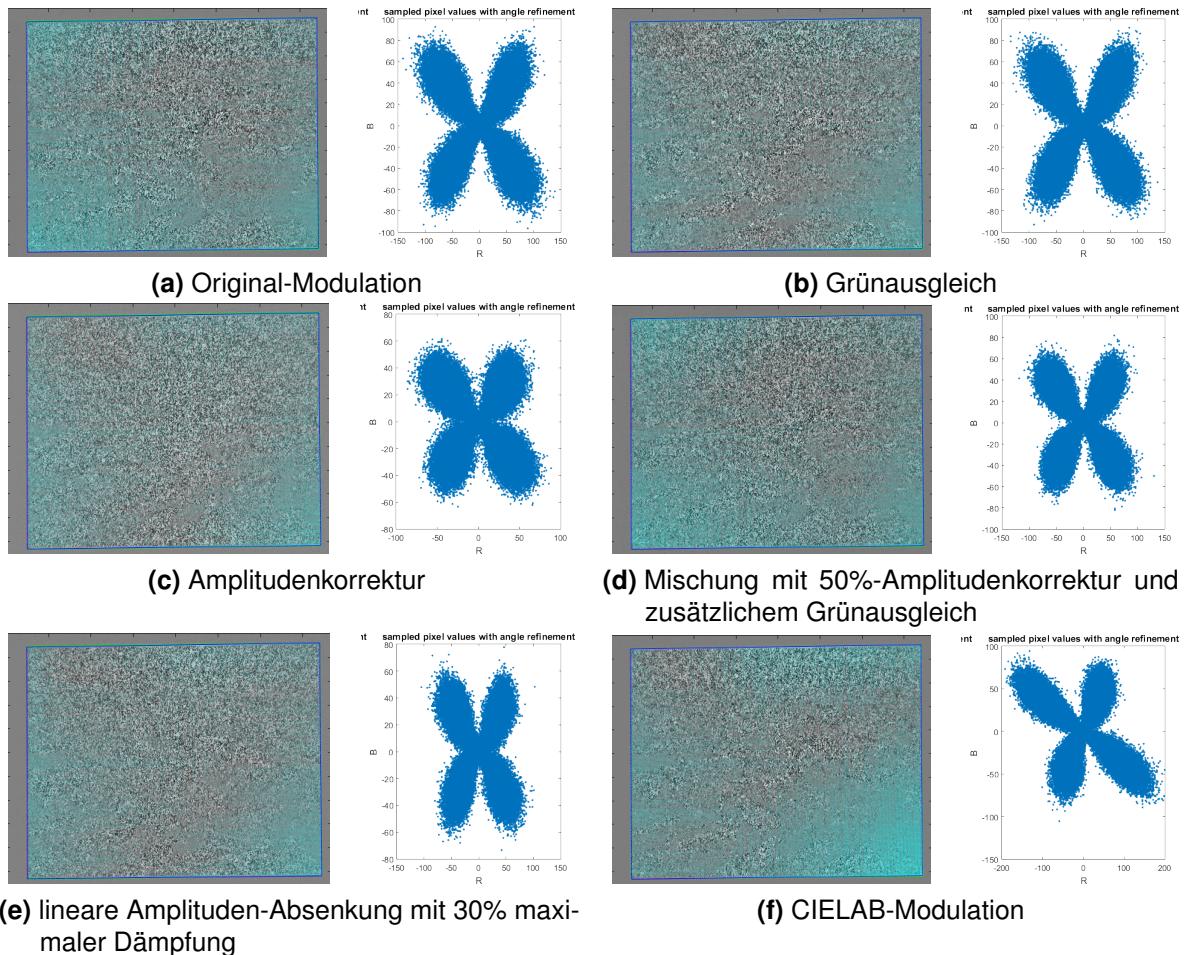


Abbildung 5.3: Differenzbilder und Konstellationsdiagramme für das Bild „Dortmund.jpg“; die Verfahren mit Grünausgleich oder Amplitudenkorrektur in Abb. 5.3b bis 5.3e setzen eine Amplitudenbegrenzung in dunklen Pixeln mit linearem Übergang ein

Die weiteren resultierenden Grafiken sind in Abb. 5.3 und 5.4 zu finden. Bei allen Differenzbildern lässt sich

- in dunklen Bildpartien – wie z. B. den Fassaden unten rechts im Bild „Dortmund.jpg“ oder unten links in „windmill.png“ – ein geringeres Differenzsignal,
- in hellen Bereichen dagegen – z. B. der Himmel in „Dortmund.jpg“ oder das weiße Schild in „windmill.png“ – ein stärker ausgeprägtes Signal ableSEN.

Dies spiegelt die in Abschnitt 3.1 erläuterte Verzerrung der Aussteuerung durch die Gradation

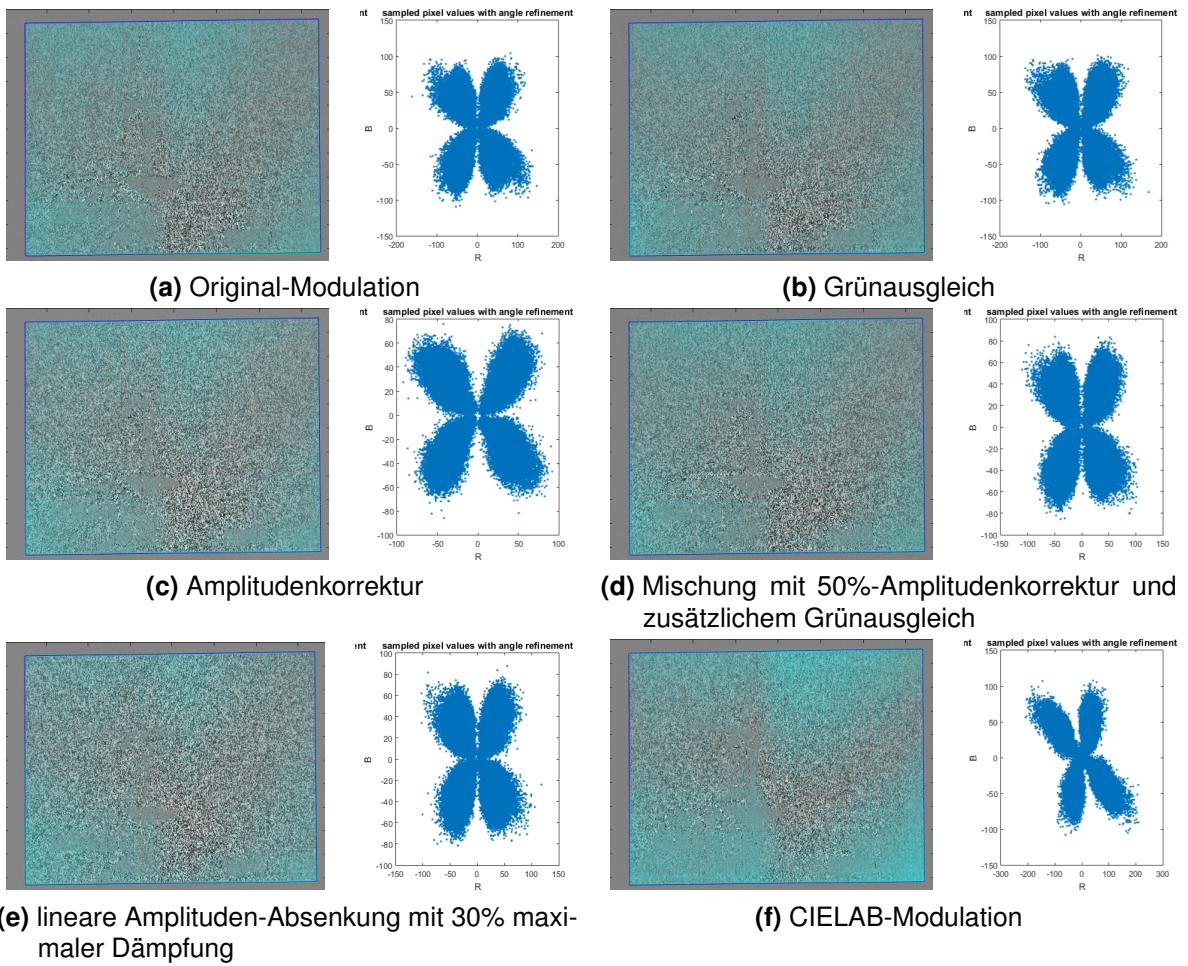


Abbildung 5.4: Differenzbilder und Konstellationsdiagramme für das Bild „windmill“; die Verfahren mit Grünausgleich oder Amplitudenkorrektur in Abb. 5.4b bis 5.4e setzen eine Amplitudengrenzung in dunklen Pixeln mit linearem Übergang ein

wieder und erklärt den oben genannten Zusammenhang zur BER.

Die Signalverteilung in den Differenzbildern von der OM und dem GA unterscheiden sich kaum, während sie bei der AC sowie in abgeschwächter Form bei der Mischung und der Dämpfung gleichmäßiger ausfällt. Die Hypothesen in Kapitel 3 werden so bestätigt: Da der GA verglichen mit der OM nur Grün anpasst, gleichen sich die dargestellten R- und B-Differenzen. Die AC und zum Teil die Mischung korrigieren diese hingegen, wenn auch nicht in den oben erwähnten, dunklen Bildbereichen, wo die Amplitudengrenzung eine vollständige Korrektur verhindert. Hier manifestieren sich zur OM vergleichbare Differenzen. Auch die Dämpfung bewirkt anscheinend die erwünschte Amplitudenreduktion, allerdings nicht so sehr wie die AC (beispielsweise erkennbar im Himmel vom Bild „windmill.png“).

Die Konstellationsdiagramme zeigen, dass bei der AC die Signale, wie aufgrund der Korrektur der Gradation zu erwarten, weniger extrem aussteuern. Die Signal-Punktewolken erstrecken

sich bei der OM und in ähnlicher Weise bei der GA (s. o.) maximal bis ca. ± 100 in R und ± 80 in B . Am kompaktesten fallen sie bei der AC mit maximal ca. ± 75 in R und ± 60 in B aus, gefolgt von der Mischung und der Dämpfung.

Die Modulation in CIELAB führt zu einer Betonung der Cyan-Farbtöne in den Differenzbildern. Außerdem erscheint das typische kreuzförmige Keulenmuster des Konstellationsdiagramms verzerrt und um einen Winkel von ca. -20° gedreht. Daraus lässt sich folgern, dass die Aussteuerung in den neu gewählten Modulationskanälen a^* und b^* nicht mehr mit Blau und Rot korreliert, also R und B nicht unabhängig voneinander moduliert werden. Dementsprechend kann auch keine korrekte Schwellenwertentscheidung zur Decodierung erfolgen.

5.2 Luminanzmessung

Am gleichen Aufbau wie in Abschnitt 5.1 wurde die Leuchtdichte des Monitors im Abstand von ca. 11 cm mithilfe des Photometers BM-5AS gemessen (siehe Tabelle 5.1 und Abb. 5.5). Dieses wurde auf den kleinsten Messwinkel von $0,1^\circ$ für einen Messbereich von ca. 1,6 mm Durchmesser eingestellt und mittels Stativ auf einen möglichst kleinen Monitorbereich ausgerichtet. Die Messung erfolgte für zwei statische Testbilder mit (a) dunklen bzw. schwarzen oder (b) roten Pixeln im Messbereich sowie jeweils unter Anwendung von drei Modulationsverfahren: (i) OM, (ii) GA und (iii) AC.



Abbildung 5.5: Versuchsaufbau zur Photometrie im roten Bildschirmbereich

Mit dem analogen Ausgang des Photometers verbunden stellte ein Oszilloskop die Messwerte als proportionale Spannungen über der Zeitachse dar, wie in Abb. 5.6 und 5.7 zu sehen.

5 Messungen

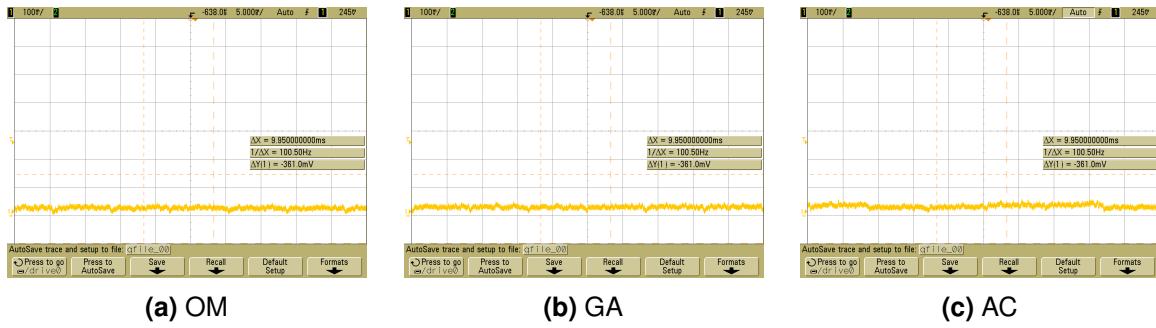


Abbildung 5.6: gemessene Luminanzen für dunkle Pixel bei verschiedenen Modulationsverfahren

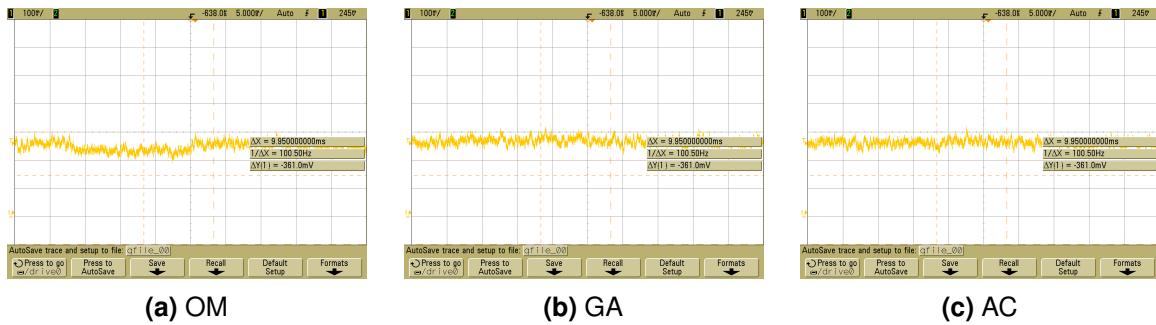


Abbildung 5.7: gemessene Luminanzen für rote Pixel bei verschiedenen Modulationsverfahren

5.2.1 Messergebnisse und -auswertung der Luminanzmessung

Die Werte schwanken um ein niedriges bzw. hohes Niveau – erwartungsgemäß entsprechend der verschiedenen Monitor-Helligkeiten in Fall (a) bzw. (b) – und weisen kleine, abrupte Sprünge ca. alle 16,7 ms auf (besonders deutlich in Abb. 5.6a). Zurückgeführt werden kann dieser Effekt auf die Framewiederholung mit $60 \text{ Hz} \approx 1/16,7 \text{ ms}$, bei der auch die Modulationsamplitude wechselt. Dabei ändert sich im Fall (a) für die AC und im Fall (b) noch stärker für die OM auch der mittlere Luminanzpegel. Interpretieren lässt sich dieser Wiedergabefehler durch die Gradation. Wie Abschnitt 3.1 erläutert, verstärkt sie die Aussteuerung hoher Signalwerte (hier: R) und erzeugt eine Abweichung der Luminanz Y bei der OM.

Im Vergleich kompensieren die neuen Verfahren GA und AC diese anscheinend und erfüllen das Ziel der konstanten Helligkeit erfolgreicher (zu sehen in Abb. 5.7b und 5.7c). Auch die theoretische Anhebung der Modulationsamplitude durch die AC für geringe Signale im Fall (a) wird durch die Messung in Abb. 5.6c bestätigt, insofern die Leuchtdichte-Schwankung etwas höher ausfällt als für die anderen Methoden (s. o.).

5.3 Zusammenfassung

Die Messungen demonstrieren, dass:

1. der GA und die AC die theoretischen Überlegungen mit dem Ziel einer konstanten Helligkeit erfüllen,
2. die AC die gewünschten wiedergegebenen Amplituden erzeugt und damit die Decodierbarkeit verbessert,
3. die Fehlerraten der neuen Methoden ähnlich zur OM sind,
4. nur die L*a*b*-M. (L*a*b*-Modulation) in dieser Form nicht praktikabel ist und
5. die LD und die Mischung einen Kompromiss zwischen der AC und OM erreichen.

6 Subjektiver Test

Es wurde eine subjektiver Test der ausgewählten, neuen Verfahren durchgeführt, um die Beeinflussung der Bildqualität und damit verknüpften Erkennbarkeit der Modulation zu untersuchen.

6.1 Testmethodik

Zum Vergleich mit der OM, wird wie auch in früheren Untersuchungen [64] und von der ITU [48] empfohlen eine Variante des DSIS- bzw. SC-Tests durchgeführt. Vorgeführt werden Paare von Sequenzen A und B, wobei A oder B zufällig die unverarbeitete Referenz ist und die jeweils andere Variante moduliert wird. Ab dem zweiten Durchlauf des gleichen Paars werden die Probanden benachrichtigt, auf einer *comparison scale* (siehe Tabelle A.2) A und B miteinander qualitativ vergleichen zu dürfen. Graue Zwischenbilder Z mit dem Hinweis „A“ oder „B“ sowie einer fortlaufenden Nummer trennen die Szenen für 3 s. Eine Bewertung soll spätestens in der 5-sekündigen Pause P zwischen den Paaren erfolgen.

Die zu untersuchenden Testbedingungen umfassen:

- eine Selektion der Modulationsmethoden aus Abschnitt 3.11 unter Beachtung der Ergebnisse aus Kapitel 5:
 1. OM: zeitlich-differentielle Chrominanzmodulation mit der Modulationsamplitude A und Blockgröße $B = 4$
 2. GA (vgl. Abschnitt 3.3) mit AL durch Schwellenwerte (vgl. Abschnitt 3.6.1) sowie linearem Übergang
 3. Mischung: AC zu 50% mit nachfolgendem GA nach Punkt 2
- und drei verschiedene Modulationsamplituden $A \in \{4; 8; 12\}$, um den Einfluss auf die Sichtbarkeitschwelle (JND) zu ermitteln und mit früheren Testergebnissen aus [64] vergleichen zu können.

Die konstante Blockgröße von $B = 4$ und eine Frame-Rate von 60 Hz¹ stellt realistische, kritische Prüfverhältnisse für die Sichtbarkeit der Anwendung her. Gamma wurde mit $\gamma = 2,2$ angenommen.

Alle Kombinationen von $n = 4$ Test-Sequenzen (siehe Abschnitt 6.2) und $m = 3 \times 3$ Testbedingungen müssen in zufälliger Reihenfolge gezeigt werden, also insgesamt: $N = n \times m =$

¹ Für Standard-Kameras geeignet; ergibt eine hinreichende Datenrate von 30 bit/s pro Bildpunkt [64]

$4 \times 3 \times 3 = 36$. Mit der Sequenzdauer $t_S = 7\text{ s}$, $t_Z = 3\text{ s}$ für die Zwischenbilder und $t_P = 5\text{ s}$ Bewertungspause dauert die Test-Session folglich:

$$t_T = N \cdot (4 \cdot t_S + 4 \cdot t_Z + 1 \cdot t_P) = 36 \cdot 45\text{ s} = 27\text{ min} \quad (6.1)$$

Nach folgendem Schema läuft eine einzelne Testeinheit i für das Paar AB ab:

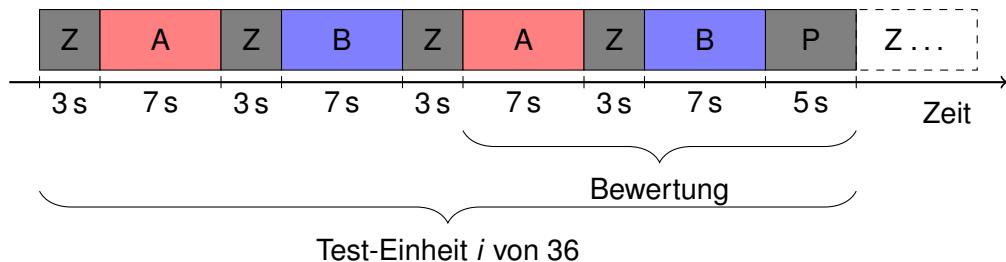


Abbildung 6.1: Prozedur des subjektiven Tests

6.2 Testmaterial

Verwendet wurden in dem Test insgesamt vier Sequenzen – die gleichen wie in vorherigen Untersuchungen –, davon drei Test-Videos der RMIT University[115] und ein Standbild. Diese stellen einen Kompromiss zwischen der auf 30 Minuten begrenzten Zeit und zur kritischen Prüfung der Systeme notwendigen repräsentativen Vielfalt her. Die Bilder haben eine Größe von 1920×1080 Pixeln, die Videos liegen im H.264/MPEG-4-AVC-Format, das Standbild im PNG-Format vor. Die einzelnen Merkmale sind in Tabellen 6.1 und 6.2 zusammengefasst. Zur Beurteilung der Farbeigenschaften sind im Anhang D die Histogramme² für die Kanäle RGB , die Helligkeit (V) und die Sättigung (S) aufgetragen.

Tabelle 6.1: Beschreibung verwendeter Testsequenzen

Nr.	Titel	Beschreibung
1	„Autobahn“[116]	Kameraschwenk – befahrene Autobahn
2	„Campus“[117]	Totale (statisch) – Fußgänger und ruhende Personen im urbanen Parkgelände
3	„Strasse“[117]	Totale (statisch) – Personen- und Fahrzeugverkehr auf Straße mit Beschilderung und Gebäuden
4	„windmill“	Standbild – Windmühle vor blauem Himmel in ländlicher Umgebung

² Die Werte wurden bei den Videosequenzen aus den Frames gemittelt.

Tabelle 6.2: Ausprägung von Prüfmerkmalen in den verwendeten Testsequenzen

Nr.	Bildbereiche		Farben				Hautton	Bewegung		Details
	hell	dunkel	Rot	Grün	Blau	Grau		Bild	Kamera	
1	1	0	1	0	0	2	0	2	2	0
2	1	0	0	2	0	1	2	1	0	1
3	2	1	2	1	1	1	1	2	0	2
4	2	2	1	1	2	0	0	0	0	1

Ausprägung des Merkmals:
0 : (fast) nicht – 1 : im geringen Maß – 2 : stark

Es ist anzunehmen, dass vor allem dunkle oder gesättigt rote Bildbereiche, wenig Bewegung oder Textur in den Details die Modulationssichtbarkeit negativ beeinflussen (s. Abschnitt 3.1). Daher müssten sich die Sequenzen 3 und 4 als kritischer für die Anwendung erweisen.

6.3 Testdurchführung

Nach der theoretischen Vorbereitung erfolgte die praktische Umsetzung:

1. Die Testprozedur wird durch ein MATLAB-Script implementiert, welches:
 - a) eine zufällige Reihenfolge aller Kombinationen von Sequenzen und Testparametern, also Modulationsgrad und -methoden, erzeugt,
 - b) zusammen mit Datum, Uhrzeit und Probandendaten speichert und
 - c) zur Bearbeitung und sequentiellen Wiedergabe automatisch an die Grafikkarte weiterreicht,
 - d) Zwischensequenzen generiert und
 - e) vorab eine Beispielsequenz zeigt.
2. Die Testumgebung wurde vorbereitet (s. Abschnitt 6.4), die den Anforderungen nach Abschnitt 2.6.2 genügt.
3. 21 Probanden wurden rekrutiert,
 - a) eingangs ihre Daten erfasst (Name, Alter, Geschlecht, Beschäftigung, Erfahrung in der Bildqualitätsbewertung und Expertise bzw. Vorwissen in der Bildsignalverarbeitung),
 - b) auf Normalsichtigkeit mit der Snellen-Tafel – eventuell mit Sehhilfe – und Farbenfehl-sichtigkeit anhand der Ishihara-Farbtafeln geprüft,
 - c) über den Test aufgeklärt und
 - d) an vier Tagen unter konstanten Bedingungen zum subjektiven Test gebeten.
4. Schließlich wurden die Ergebnisse ausgewertet.

6.4 Testaufbau

Der Aufbau des Experiments erfolgt nach ITU-R BT.2022 [50] für den OLED-Flachbildschirm LG 55EF950V (siehe Tabelle 5.1) mit einer Bilddiagonale von 55 in bei Ultra-HD-Auflösung von 3840×2160 Pixeln [109], die allerdings für die 1920×1080 Pixel großen Sequenzen nicht ausgenutzt wird. Die Bildkalibrierung genügt den Vorgaben aus ITU-R BT.814 und BT.815 [27], [118]. Neutrale Einstellungen und eine Deaktivierung von Automatiken verhindern bildverändernde Störungen.

Das Leuchtdichtemessgerät LS-100³ misst die in Tabelle 2.6 aufgeführten Werte bei senkrechter Ausrichtung auf den Bildschirm bzw. Hintergrund. Scheinwerfer leuchten den ansonsten durch Vorhänge abgedunkelten Raum hinter dem Fernseher aus, wie auf dem Foto Abb. 6.2 zu sehen. Der gewählte Betrachtungsabstand von $3,2H$ entspricht dem DVD-Wert der Tabelle aus ITU-R BT.2022 [50] für 1920×1080 Bildpunkte und ermöglicht eine kritische Untersuchung der Sichtbarkeit der Modulation. Bei einer Höhe $H = 68$ cm beträgt die Distanz 217,6 cm.



Abbildung 6.2: Aufbau des subjektiven Tests

Der einzuhaltende Betrachtungsabstand zu Snellen-Tafel und Bildschirm wird mit dem Laser-Entfernungsmesser GLM 150⁴ von Augenhöhe der Versuchsteilnehmer gemessen. Außerdem ist die Sicht vertikal und horizontal mittig zu adjustieren, um einen konstanten Blickwinkel zum Bildschirm sicherzustellen (vgl. Blickwinkelabhängigkeit in Abschnitt 2.4).

³ 14,4 mm-Messbereich [110]

⁴ GLM 150 Professional von BOSCH mit einem Messbereich von 0,05 m bis 150 m und einer typischen Messgenauigkeit von ± 1 mm [111]

6.5 Testergebnisse und -auswertung

In Abb. 6.3a bis 6.3h sind die ausgewerteten MOSs zusammen mit den Konfidenzintervallen (für ein 95%-Konfidenzniveau) für die Sequenzen und Modulationsmethoden jeweils über der Modulationsamplitude aufgetragen. Den numerischen Werten liegt die Bewertungsskala in Tabelle A.2 zugrunde, wobei immer die verarbeitete Variante gegenüber der Originalsequenz verglichen wird.

Von den 21 Testpersonen⁵:

- waren drei weiblich,
- waren alle zwischen 21 bis 30 und im Mittel 24,4 Jahre alt, davon 14 nicht älter als 25,
- gaben ein Betrachter Expertise in Bildsignalverarbeitung und
- drei Erfahrung in der Bildqualitätsbewertung an,
- war eine Person wissenschaftliche(r) Mitarbeiter(in) und der Rest studierend,
- trugen elf Personen Sehhilfen und es
- waren 15 normalsichtig mit einem Visus von 1,0⁶ oder besser sowie
- fünf mit einem Visus von 0,8⁷.

Eine Person ist von Deutanopie⁸ betroffen und besitzt nur eine Sehschärfe von 0,66⁹, weswegen die Ergebnisse herausgefiltert sind.

In der Gesamt-Analyse in Abb. 6.3h zeigt sich allgemein Folgendes für die MOSs:

- Die MOSs nehmen mit dem Modulationsgrad bis zu –2,175 für die Mischung ab, wobei die Bewertungen bei Grad 4 nahe 0, also „gleich“ auf der Skala, liegen. Demzufolge ist die Modulation praktisch erst für höhere Amplituden merklich störend.
- Die Werte weisen für die OM und den GA nur geringe Unterschiede auf; nur für den höheren Modulationsgrad 12 wird die OM etwas besser beurteilt (um ca. 3,7%).
- Die Mischung wird bis zur 2,1-mal so schlecht bewertet wie die OM.
- Alle Konfidenzintervalle nehmen ähnlich geringe Werte zwischen $\pm 0,112$ und $\pm 0,226$ um die Mittelwerte an. Die Bewertungen weichen somit von Proband zu Proband nur wenig voneinander ab und können somit als statistisch aussagekräftig eingestuft werden.

Bei der getrennten Auswertung für die einzelnen Modulationsmethoden lassen sich die Abhängigkeiten von den Testsequenzen untersuchen. In Abb. 6.3e für die OM werden die Sequenzen

⁵ Die Anzahl erfüllt die Bestimmungen aus ITU-R BT.500 [48]

⁶ Snellen: 20/20 in Fuß

⁷ Snellen: 20/25

⁸ Grünblindheit

⁹ Snellen: 20/30

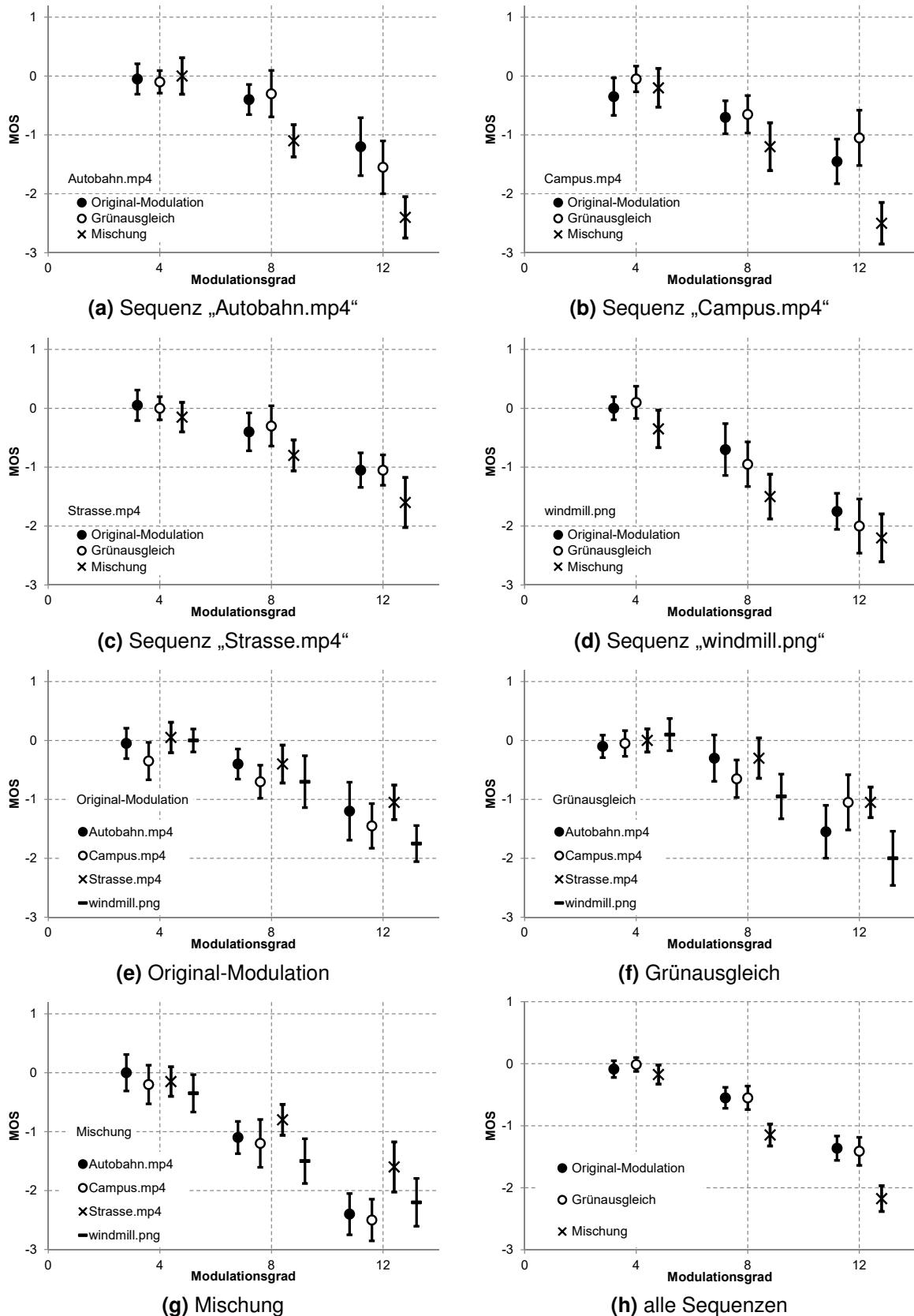


Abbildung 6.3: ausgewertete MOSS mit Konfidenzintervallen (für ein 95%-Konfidenzniveau) aufgetragen über die Modulationsamplitude

„Campus.mp4“ und „windmill.png“ am schlechtesten bewertet, „Strasse.mp4“ dagegen am besten. Allgemein fallen die MOS in Abb. 6.3c verglichen mit denen in Abb. 6.3a, 6.3b und 6.3d höher aus. Eventuell erschweren die vielen Bewegungen und der hohe Detailgrad im Bild die Wahrnehmung der Modulation. Aussagen mehrerer Teilnehmer nach dem Test, kaum Unterschiede in den bewegten Videos feststellen zu können und stattdessen leichter im statischen Bild „windmill.png“ sowie den Grautönen der Sequenzen „Campus.mp4“ und „Autobahn.mp4“, bestätigen diese These. Damit muss die vorangehende Einschätzung von „Strasse.mp4“ als kritischste Sequenz revidiert werden (siehe Abschnitt 2.6.2).

Die MOSs in Abb. 6.3g für die Mischung sind im ähnlichen Verhältnis zueinander wie für die OM, jedoch insgesamt kleiner. Nur bei der Sequenz „Strasse.mp4“ wird die Bildqualität relativ betrachtet besser bewertet, was auf die oben genannten Gründe zurückzuführen ist. Bei Abb. 6.3f für den GA fällt der positive MOS für den Modulationsgrad 4 in der Sequenz „windmill.png“ auf: Demnach würde das modulierte Bild von einigen Testpersonen sogar favorisiert werden – womöglich entweder aufgrund unabsichtlicher Bewertungsfehler oder tatsächlich einer subjektiv wahrgenommenen Verbesserung (z. B. als scheinbare Detailschärfe). Wahrscheinlich jedoch muss die Signifikanz der Ergebnisse für die Amplitude 4 relativiert werden, da die geringe Sichtbarkeit der Modulation qualitativ präzise Beurteilungen beeinträchtigt. Dafür spricht überdies, dass der GA im selben Bild bei höheren Modulationsgraden wesentlich negativer eingestuft wird.

Des weiteren merkten einige Probanden im Nachhinein an, dass anfangs noch keine ausreichende Vorstellung von Referenzwerten auf der Skala existieren. Daher muss berücksichtigt werden, dass die anfangs abgegebenen Bewertungen gegebenenfalls Qualitätseinstufungen nicht präzise repräsentieren.

6.6 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen keine deutliche Verbesserung der subjektiven Bildqualität durch die neueren Verfahren gegenüber der OM ableSEN. Der GA erzielt bei geringeren Modulationsgraden abhängig von der Testsequenz tendenziell bessere Ergebnisse, die Mischung allerdings wird mehrheitlich von den Probanden abgelehnt. Weiterführende Tests mit anderem Material, zusätzlichen Modulationsvarianten und einem größeren Probanden-Spektrum könnten die Aussagekraft und ableitbare Ergebnisse verbessern.

7 Zusammenfassung

Verschiedene Ansätze zu Minimierung des Gradationseffektes auf die Modulationsmethode wurden entwickelt und nach der technischen Umsetzung erprobt. Die ausgewerteten Messungen der Helligkeitsänderung und Robustheit in Testübertragungen filtern ungeeignete Verfahren wie die L*a*b*-M. aus und schränken die Auswahl auf die vielversprechendsten ein:

1. dem GA im Hinblick auf die erfolgreiche Helligkeitsnivellierung und Reduktion der Sichtbarkeit (besonders in Rottönen) und
2. der Mischung von AC und zusätzlichem GA aufgrund eines akzeptablen Kompromisses zwischen der Verringerung von wahrnehmbaren Rauschen und einer Verbesserung der Decodierbarkeit.

Die Ergebnisse des subjektiven Tests demonstrieren eine tendenzielle Favorisierung des GA gegenüber der OM für moderate Modulationsamplituden, jedoch eine deutliche Ablehnung der AC. Die Bewertung der Bildqualität ist jedoch erheblich vom Bewegungsmaß und Kolorit des Videomaterials geprägt. Eventuell ließe sich der Zusammenhang für die verborgene Dateneinbettung ausnutzen.

Insgesamt erweist sich der GA als bester Kandidat eines optimierten Modulationsverfahrens. In Zukunft wären die Feinjustierung der Parameter und Limitierungen sowie eine Optimierung und finale Integration des Codes z. B. durch Auslagerung der Funktionen denkbar. Hierzu sind weitere Übertragungen für objektive Qualitätsmaße und zusätzliche subjektive Tests mit einer größeren Teilnehmerzahl und kritischeren Sequenzen ratsam. Auch sollten sowohl die Messung als auch die adaptive Berücksichtigung verschiedener standardisierter oder gerätespezifischer Gradationskennlinien erwogen werden. Vor allem spezielle Effekte einiger Monitore wie der Hintergrundbeleuchtung oder Blickwinkelabhängigkeit könnten in dem Zusammenhang erforscht werden.

A Anhang: Bewertungsskalen der ITU

Tabelle A.1: fünfstufige Bewertungsskalen der Qualität (*quality scale*) oder Qualitätsminderung (*impairment scale*) gemäß ITU-R [48]

Zahl	Bewertung	
	<i>impairment</i>	<i>quality</i>
5	nicht wahrnehmbar	exzellent
4	wahrnehmbar, nicht störend	gut
3	leicht störend	befriedigend
2	störend	mangelhaft
1	sehr störend	schlecht

Tabelle A.2: Vergleichsskala der ITU-R (*comparison scale*) [48]

Zahl	Bewertung
-3	viel schlechter
-2	schlechter
-1	geringfügig schlechter
0	gleich
+1	geringfügig besser
+2	besser
+3	viel besser

B Anhang: Code-Auszug

Quellcode B.1: Auszug aus dem Cuda-Quellcode zur Umsetzung der neuen Modulationsmethoden

```
1 // Modulations Amplitude umrechnen in RGB
2 float currentModulatedBit_R = YUV_to_RGB[1] * currentModulatedBit_U + ←
3     YUV_to_RGB[2] * currentModulatedBit_V;
4 float currentModulatedBit_G = YUV_to_RGB[4] * currentModulatedBit_U + ←
5     YUV_to_RGB[5] * currentModulatedBit_V;
6 float currentModulatedBit_B = YUV_to_RGB[7] * currentModulatedBit_U + ←
7     YUV_to_RGB[8] * currentModulatedBit_V;
8
9
10 // Original-Modulation (OM) - Zwischenspeichern
11 float Rmod = max(R0 + currentModulatedBit_R, 0.0);
12 float Gmod = max(G0 + currentModulatedBit_G, 0.0);
13 float Bmod = max(B0 + currentModulatedBit_B, 0.0);
14
15 // neues Ausgangs-RGB-Signal nach Modulation
16 float Rnew = Rmod; float Gnew = Gmod; float Bnew = Bmod;
17
18 if (modMode == 2 || modMode == 3) { // Amplitudenkorrektur (AC)
19     // Gammaverzerrung
20     float R2 = pow(R0, gamma);
21     float G2 = pow(G0, gamma);
22     float B2 = pow(B0, gamma);
23     // mit geforderten Amplituden modulieren; Clipping
24     float R2mod = max(R2 + currentModulatedBit_R, 0.0);
25     float G2mod = max(G2 + currentModulatedBit_G, 0.0);
26     float B2mod = max(B2 + currentModulatedBit_B, 0.0);
27     // Gammakorrektur
28     Rnew = pow(R2mod, gammaInv);
29     Gnew = pow(G2mod, gammaInv);
30     Bnew = pow(B2mod, gammaInv);}
31
32 if (modMode == 3) { // Mischung
33     Rnew = newModMix * Rnew + (1 - newModMix) * Rmod;
34     Gnew = newModMix * Gnew + (1 - newModMix) * Gmod;
35     Bnew = newModMix * Bnew + (1 - newModMix) * Bmod;}
36
37 if (modMode == 4) { // lineare Daempfung
38     float Xm = 0.0; float m = ModAmpDamping / (1.0 - Xm);
39     Rnew = R0 + currentModulatedBit_R * (1 - (R - Xm) * m);
40     Rnew = max(Rnew, 0.0); // Begrenzung
41     Rnew = min(Rnew, 1.0);
42     Bnew = B0 + currentModulatedBit_B * (1 - (B - Xm) * m);
```

```

39 Bnew = max(Bnew, 0.0);
40 Bnew = min(Bnew, 1.0);}
41
42 if (modMode == 1 (modMode == 3 && plusGcorr) (modMode == 4 && ←
    plusGcorr)) { // Gruenausgleich
43 // Zielhelligkeit nach Gradation
44 float R2 = pow(R0, gamma);
45 float G2 = pow(G0, gamma);
46 float B2 = pow(B0, gamma);
47 float Y2 = RGB_to_YUV[0] * R2 + RGB_to_YUV[1] * G2 + RGB_to_YUV[2] * B2;
48 // Gradation nach Modulation
49 float Rmod2 = pow(Rnew, gamma);
50 float Bmod2 = pow(Bnew, gamma);
51 float Gmod2 = Y2 - RGB_to_YUV[0] * Rmod2 - RGB_to_YUV[2] * Bmod2; ←
    //Zwischenwert
52 Gmod2 = max(Gmod2/RGB_to_YUV[1], 0.0); //korrigierter Gruenanteil
53 Gnew = pow(Gmod2, gammaInv);}
54
55 if (modMode == 5) { // Modulation in CIELab
56 float da = 12; float db = 12; //Amplituden
57
58 // sRGB -> linear RGB
59 Rnew = R0; Gnew = G0; Bnew = B0;
60 if ( Rnew > 0.04045 ) {
61     Rnew = pow( ( ( Rnew + 0.055 ) / 1.055 ), 2.4);
62 } else Rnew = Rnew / 12.92;
63 if ( Gnew > 0.04045 ) {
64     Gnew = pow( ( ( Gnew + 0.055 ) / 1.055 ), 2.4);
65 } else Gnew = Gnew / 12.92;
66 if ( Bnew > 0.04045 ) {
67     Bnew = pow( ( ( Bnew + 0.055 ) / 1.055 ), 2.4);
68 } else Bnew = Bnew / 12.92;
69
70 // RGB (linear) -> XYZ
71 float X = Rnew * 0.4124 + Gnew * 0.3576 + Bnew * 0.1805;
72 float Y = Rnew * 0.2126 + Gnew * 0.7152 + Bnew * 0.0722;
73 float Z = Rnew * 0.0193 + Gnew * 0.1192 + Bnew * 0.9505;
74
75 // Normieren auf Normalbeobachter, D65
76 float Xn = 0.95047;
77 float Yn = 1.00000;
78 float Zn = 1.08883;
79 X = X / Xn; Y = Y / Yn; Z = Z / Zn;
80
81 // XYZ -> L*a*b*
82 float d = 0.008856;

```

```

83 if (X > d) { X = cbrt(X); }
84 else { X = ( 7.787 * X ) + ( 16.0 / 116.0 ); }
85 if (Y > d) { Y = cbrt(Y); }
86 else { Y = ( 7.787 * Y ) + ( 16.0 / 116.0 ); }
87 if (Z > d) { Z = cbrt(Z); }
88 else { Z = ( 7.787 * Z ) + ( 16.0 / 116.0 ); }
89 float L = ( 116 * Y ) - 16;
90 float a = 500 * ( X - Y );
91 float b = 200 * ( Y - Z );
92
93 a = a + da; b = b + db; //modulieren
94
95 // L*a*b* -> XYZ
96 Y = L / 116.0 + 16.0/116.0;
97 X = a / 500.0 + Y;
98 Z = - b / 200.0 + Y;
99
100 d = 6/29;
101 if (X > d) { X = X * X * X; }
102 else { X = (X - 16.0/116.0) / 7.787; }
103 if (Y > d) { Y = Y * Y * Y; }
104 else { Y = (Y - 16.0/116.0) / 7.787; }
105 if (Z > d) { Z = Z * Z * Z; }
106 else { Z = (Z - 16.0/116.0) / 7.787; }
107 X = Xn * X; Y = Yn * Y; Z = Zn * Z;
108
109 // XYZ -> sRGB (linear)
110 Rnew = 3.2404542 * X - 1.5371385 * Y - 0.4985314 * Z;
111 Gnew = -0.9692660 * X + 1.8760108 * Y + 0.0415560 * Z;
112 Bnew = 0.0556434 * X - 0.2040259 * Y + 1.0572252 * Z;
113 if (Rnew > 0.0031308) {
114     Rnew = powf(Rnew, 1.0 / 2.4) * 1.055 - 0.055;
115 } else { Rnew = Rnew * 12.92; }
116 if (Gnew > 0.0031308) {
117     Gnew = powf(Gnew, 1.0 / 2.4) * 1.055 - 0.055;
118 } else { Gnew = Gnew * 12.92; }
119 if (Bnew > 0.0031308) {
120     Bnew = powf(Bnew, 1.0 / 2.4) * 1.055 - 0.055;
121 } else { Bnew = Bnew * 12.92; } }
122
123 \\...Modulationskonditionen und Begrenzungen...
124 outR[ idxGlobal ] = Rnew; //Ausgabe
125 outG[ idxGlobal ] = Gnew;
126 outB[ idxGlobal ] = Bnew;

```