

Dynamikerweiterung durch Weissabgleich im Bildsensor

Michael Schöberl¹, Wolfgang Schnurrer²,
Siegfried Föbel² and André Kaup¹

¹Lehrstuhl Multimediakommunikation
und Signalverarbeitung,
Universität Erlangen-Nürnberg,
Cauerstr. 7, 91058 Erlangen

²Fraunhofer IIS,
Am Wolfsmantel 33,
91058 Erlangen

Zusammenfassung Heutige Kameras besitzen eine feste spektrale Empfindlichkeit und können bei Beleuchtung ungünstiger Farbtemperatur nur einen reduzierten Dynamikbereich aufnehmen. Diese Einschränkung kann über ein neues Verfahren deutlich reduziert werden: Über ein digitales Neutraldichtefilter (ND-Filter) wird eine selektive Reduktion der Sensorempfindlichkeit für manche Farbkanäle erreicht. Dies führt zu einer Angleichung der Farbkanäle und damit einer Erweiterung des nutzbaren Dynamikumfangs. Die Anpassungen können digital schaltbar realisiert werden bei gleichzeitigem Erhalt der Blende, Bewegungsunschärfe und Sensorempfindlichkeit.

1 Einleitung

Bei der Aufnahme von Szenen ist die Aufnahme durch einen begrenzten Dynamikumfang der Kamera bestimmt. Für eine Aufnahme wird ein möglichst großer Dynamikumfang benötigt, um möglichst viele Objekte einer Szene gut abbilden zu können. Das Problem wird nun dadurch verschärft, dass digitale Kameras in einem breiten Anwendungsbereich eingesetzt werden und dabei die Beleuchtung der Szenen variiert. Die Spanne an Lichtquellen reicht von niedrigen Farbtemperaturen wie bei Kerzenschein und Halogenlampen über Tageslicht bis zu Kunstlicht oder heller Sonneneinstrahlung mit hohen Farbtemperaturen. Über diesen Bereich hinweg ändert sich die spektrale Verteilung der Lichts. Die spektrale Empfindlichkeit eines Bildsensors hingegen ist üblicherweise fest [5].

Dies führt zu einer ungleichen Aussteuerung des Bildsensors. Eine bei der Aufnahme als weiß empfundene Fläche wird nun farbstichig aufgenommen und gespeichert. Abbildung 1 a) zeigt die mittleren normierten Codewerte aus der Aufnahme weißer Flächen bei unterschiedlichen Farbtemperaturen T . Der dadurch nötige Weißabgleich wurde bisher in zwei Aspekten untersucht: Zunächst muss die Farbtemperatur der Beleuchtung der Szene für eine Korrektur bekannt sein. In der Consumer-Fotografie werden vielfältige Algorithmen eingesetzt um die Farbtemperatur der Beleuchtung aus einer Einzelaufnahme der Szene zu schätzen [1]. Diese Information ist im Bereich der qualitativ hochwertigen Bildaufnahme bereits aus der Gestaltung der Szene bekannt. Als zweiter Aspekt muss dann eine Korrektur auf den Bilddaten angewendet werden. Häufig wird dazu eine multiplikative Korrektur eingesetzt, die in verschiedenen Farbräumen durchgeführt werden kann [11], [10]. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine multiplikative Korrektur im Kamera-Farbraum angewendet. Die nötigen Korrekturfaktoren um wieder einen weißen Bildeindruck zu erhalten sind für die hier eingesetzte Kamera in Abbildung 1 b) dargestellt.

Die ungleiche Aussteuerung der Farbkanäle zeigt jedoch ein viel ernsteres Problem: Die Farbkanäle haben einen zueinander verschobenen Dynamikumfang. Der Bereich, in dem alle Kanäle zuverlässige Informationen über die Szene liefern überlappt nun nicht mehr so gut. Der nutzbare Dynamikumfang ist damit deutlich eingeschränkt. Eine Rekonstruktion der verlorenen Bildinhalte ist nur in speziellen Fällen möglich, beispielsweise zur Verbesserung eines unterbelichteten Farbbilds durch eine gut belichtete Aufnahme in Graustufen [4]. Vergleichbare Verfahren sind jedoch rechenaufwändig und erfordern mehrere Einzelaufnahmen.

Die besten Ergebnisse können erzielt werden, wenn eine gleiche Aussteuerung der Kanäle bereits zum Aufnahmezeitpunkt erzielt wird: Eine Anpassung der spektralen Empfindlichkeit durch Einstellung verschiedener Betriebsspannungen ist für besondere Bildsensoren möglich [12]. Dies kann direkt zur Durchführung eines Weißabgleichs bei der Aufnahme genutzt werden. Leider sind diese Mechanismen in üblichen CMOS Bildsensoren nicht umsetzbar. Ein Angleich der Aussteuerungen kann auch über unterschiedliche Belichtungszeiten für jeden der Farbkanäle erreicht werden [3, 2]. Wir vergleichen uns gegen dieses Verfahren in Abschnitt 3.3.

Unser Verfahren beinhaltet eine neue Möglichkeit zur Anpassung basierend auf einer digitalen Reduktion der Sensorempfindlichkeit über ein digitales Neutralsichtfilter (ND-Filter) [8]. Je nach notwendiger Korrektur wird es nur auf einen Teil der Farbkanäle angewendet. Dadurch wird die untere Schwelle der Sensorempfindlichkeit sowie die Bewegungsunschärfe erhalten.

Der Beitrag ist wie folgt organisiert: In Abschnitt 2 wird die digitale Aufnahme von Bewegungsbildern und die Begrenzung des Dynamikumfangs erläutert. Die bekannten Verfahren und die vorgeschlagene Möglichkeit für eine Anpassung der Aussteuerung einzelner Kanäle werden in Abschnitt 3 gezeigt. Das vorgeschlagene Verfahren wird dann in Abschnitt 4 erläutert und in Abschnitt 5 um experimentelle Ergebnisse ergänzt.

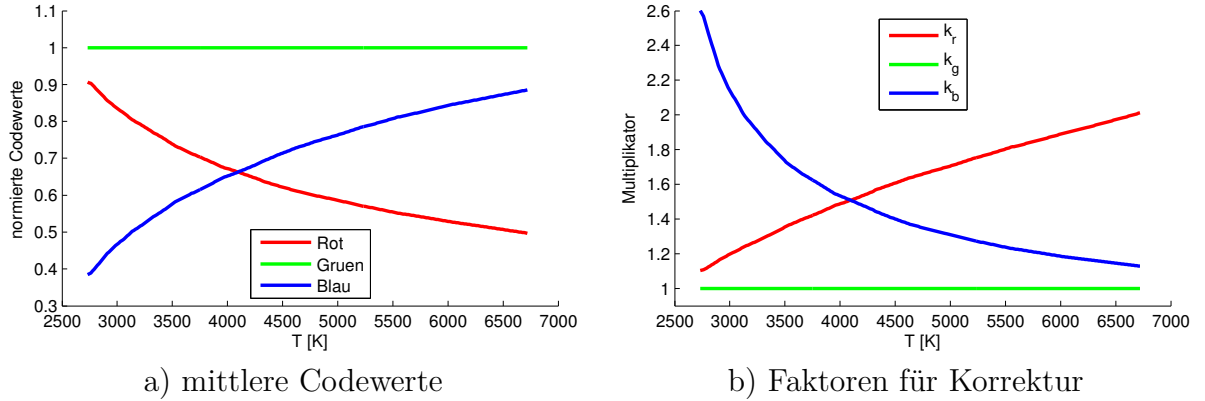


Abbildung 1: Farbantwort einer Beispielkamera für weißes Licht über die Farbtemperatur: a) Mittlere Codewerte auf grün normiert und b) nötige multiplikative Verstärkung der Farbkanäle k_r , k_g und k_b

2 Digitale Aufnahme von Farbbildern

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die grundlegenden Mechanismen der digitalen Aufnahme von Bewegtbildern aufgezeigt. Die Einschränkungen durch einen begrenzten Dynamikumfang bei der Farbbildaufnahme sind dann in Abschnitt 2.2 dargestellt.

2.1 Modell der Aufnahme von Bewegtbildern

Eine Kamera, die eine Szene aufnimmt, empfängt Licht, das aus verschiedenen Wellenlängen λ zusammengesetzt ist. Die spektrale Verteilung des zeitvarianten Strahlungsflusses wird mit $\Phi(\lambda, t)$ bezeichnet. Die geometrischen Abbildungen des Objektivs werden hier nicht weiter benötigt und wir betrachten den Strahlungsfluss, der auf jedes Photoelement des Sensors eintrifft. Ein einzelnes Photoelement der Farbe c besitzt eine spektrale Empfindlichkeit $s^{(c)}(\lambda)$. Diese beinhaltet die spektrale Empfindlichkeit der Farbfilter und die spektrale Empfindlichkeit des Sensors selbst. In jedem Photoelement entsteht aus diesen Komponenten ein zeitvarianter Photostrom $i_{\text{ph}}^{(c)}$ für einen bestimmten Farbkanal c :

$$i_{\text{ph}}^{(c)}(t) \propto \int s^{(c)}(\lambda) \cdot \Phi(\lambda, t) d\lambda \quad (1)$$

Die Proportionalität enthält die hier nicht betrachteten Komponenten wie Füllfaktor, Quanteneffizienz und Wandlungsgewinn, die ebenfalls einen Einfluss auf die Empfindlichkeit haben. Ebenso wird die Ortsabhängigkeit einer Vielzahl von Photoelementen zur Vereinfachung der Notation ausgelassen. Der Photostrom wird nun über die Belichtungs-

zeit τ_{exp} integriert und über weitere Auslesemechanismen das digitale Signal $I_{(c)}$ erzeugt:

$$I_{(c)} \propto \min \left(I_{\text{max}}, \int_{\tau_{\text{exp}}} \dot{i}_{\text{ph}}^{(c)}(t) dt + N_{\text{dynamisch}}^{(c)} \right) \quad (2)$$

Der Aufnahmevorgang ist nach oben durch einen maximalen Codewert I_{max} begrenzt. Die untere Grenze ist durch mittelwertfreies unkorreliertes zeitlich veränderliches (dynamisches) Rauschen $N_{\text{dynamisch}}^{(c)}$ mit der Standardabweichung $\sigma_{(c)}$ bestimmt. Zusätzlich sind auch statische Rauschanteile (Fixed Pattern Noise) im Signal vorhanden. Diese Anteile können und werden in hochwertigen Kameras sehr gut kompensiert [9, 7] und werden in dieser Arbeit als vollständig kompensiert angenommen.

2.2 Dynamikumfang der Farbbildaufnahme

Der Dynamikumfang einer typischen Kamera ist in der Kamerakennlinie in Abbildung 2 für eine typische Farbtemperatur von $T = 3000$ K dargestellt. Über die relative Stärke des Strahlungsflusses Φ sind die erreichten Code-Werte I doppelt-logarithmisch aufgetragen. In Abbildung 2 links ist zunächst die Kamerakennlinie für nur einen Farbkanal dargestellt. Das obere Ende des Dynamikumfangs ist durch den maximalen Codewert I_{max} gegeben. Dieser wird auf einen maximalen Strahlungsfluss $\Phi_{\text{max}}^{(c)}$ abgebildet (vertikale gepunktete Linie). Oberhalb dieser Intensität werden keine Bildinformationen mehr aufgenommen und der Strahlungsfluss für eine gut ausgeleuchtete Aufnahme muss unterhalb dieser Schwelle bleiben. Die untere Grenze des Dynamikumfangs ist durch das Bildrauschen gegeben und liegt bei einem Signal-zu-Rausch Verhältnis von 1. Die gestrichelte horizontale Linie zeigt die Standardabweichung des Rauschens $\sigma_{(c)}$ eines Dunkelbildes. Der Schnittpunkt der Standardabweichung mit der Verlängerung der linearen Kameraantwort zeigt die untere Grenze. Auch hier ergibt sich ein minimaler Strahlungsfluss $\Phi_{\text{min}}^{(c)}$ als die untere Grenze des Dynamikumfangs. Unterhalb dieser Schwelle sind keine Details im Bildrauschen mehr zu erkennen.

Abbildung 2 rechts zeigt die Kennlinien und Grenzen aller drei Farbkanäle c . Der horizontale Versatz der Kanäle zeigt die unterschiedliche relative Empfindlichkeit der Kanäle zueinander. Die Stärke der Verschiebung zueinander ist abhängig vom Kameramodell und der untersuchten Farbtemperatur. Grundsätzlich ist diese Verschiebung aber in allen digitalen Kameras vorhanden. Die sich ergebenden Grenzen des Dynamikumfangs sind in Abbildung 3 a) zusammengefasst. Die Zahlen ober- und unterhalb zeigen die Grenzen des Dynamikumfangs $\log_{10}(\Phi_{\text{min}})$ und $\log_{10}(\Phi_{\text{max}})$. Jeder einzelne Farbkanal kann für sich alleine einen Dynamikumfang von etwa 38 dB erfassen. Die unterschiedlichen Positionen entlang der Φ Achse zeigen die zueinander verschobenen Empfindlichkeiten.

Bei der Aufnahme von Farbbildern sind wir daran interessiert, Bildinformation aus allen drei Farbkanälen zum gleichen Zeitpunkt zu erfassen. Ein sicher nutzbarer Aussteuerbereich enthält daher nur den Bereich, in dem alle Farbkanäle gültige Bildwerte liefern.

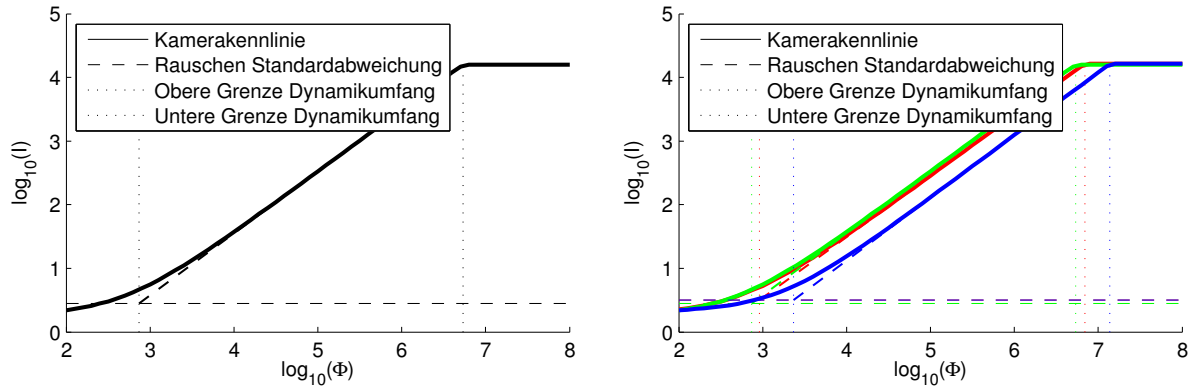


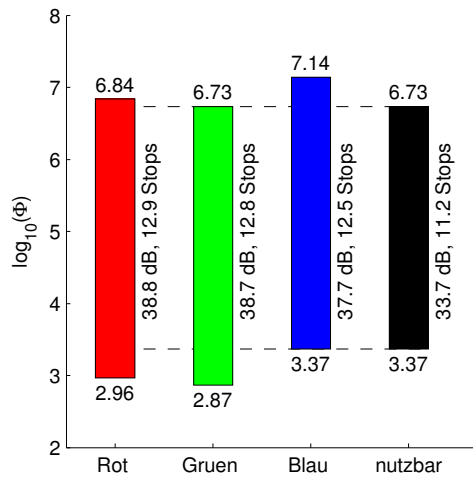
Abbildung 2: Kamerakennlinie bei $T = 3000$ K (durchgezogene Line) für einen einzelnen Farbkanal (links) und für die Kanäle Rot, Grün und Blau (rechts). Eingezeichnet sind die Standardabweichung des Rauschens $\sigma_{(c)}$ (horizontale gestrichelte Linie) und die Grenzen des Dynamikumfangs $\Phi_{\min}^{(c)}$ und $\Phi_{\max}^{(c)}$ (gepunktete vertikale Linie)

Dieser sichere Bereich ist in Abbildung 3 a) als schwarzer Balken dargestellt. Die Verschiebung der Kanäle zueinander verursacht in diesem Beispiel eine Reduktion des sicher nutzbaren Dynamikumfangs um mehr als 4 dB bzw. 1.5 Blendenstufen. Der Verlust an Dynamikumfang ändert sich über die Farbtemperatur. Die unterschiedliche Antwort der Farbkanäle bei Beleuchtung des Sensors mit weißem Licht in Abbildung 1 a) beinhaltet direkt die Verschiebung der Kanäle zueinander. Daraus kann der Verlust an Dynamikumfang für unsere Beispielskamera errechnet werden (siehe Abbildung 3 b)). Im Durchschnitt verliert die hier verwendete Kamera 2.6 dB an Dynamikumfang.

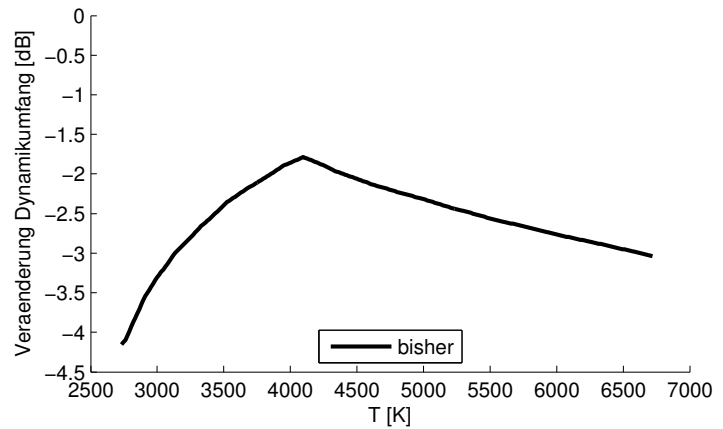
3 Methoden zur Durchführung des Weißabgleichs

Nach der Verarbeitung sollen weiße Objekte mit identischen Codewerten $I_r = I_g = I_b$ für die drei Farbkanäle repräsentiert werden. Der dazu nötige Angleich der Empfindlichkeiten kann über einen Verstärkungsfaktor pro Kanal $k_{(c)}$ realisiert werden. Einige Bildsensoren oder chemisches Filmmaterial können in Grenzen eingestellt werden, um für eine ausgewählte typische Farbtemperatur eine ausgeglichene Antwort zu liefern. In diesen Fällen können die Faktoren zu $k_{(c)} = 1$ angenommen werden. Sollte die tatsächliche von der natürlichen Farbtemperatur abweichen, dann ist dennoch ein Angleich nötig.

Für den hier beispielhaft verwendeten Sensor sind die nötigen Faktoren in Abbildung 1 dargestellt. Man sieht, dass für die Kanäle Rot und Blau ein Faktor von > 1 für alle Farbtemperaturen nötig ist. Eine natürliche Farbtemperatur ist für diesen Sensor nicht vorhanden. Bei $T = 3000$ K verwenden wir $k_r = 1.3$, $k_g = 1$ und $k_b = 2.31$.



a) Aufnahme bei $T = 3000$ K



b) Verhalten über Farbtemperatur

Abbildung 3: Resultierender Dynamikumfang einer herkömmlichen Aufnahme: a) Dynamikumfang bei $T = 3000$ K für die Kanäle Rot, Grün und Blau und sicherer Bereich für die gute Ausleuchtung aller Kanäle, b) sich ergebender Verlust für einen großen Bereich an Farbtemperaturen

3.1 Multiplikativer Weißabgleich

Die am häufigsten anzutreffende Kompensation führt eine Multiplikation z.B. im Kamerafarbraum durch. Die Bildwerte errechnen sich zu $I_{(c)} = \tilde{I}_{(c)} \cdot k_{(c)}$. Dies entspricht einer vertikalen Verschiebung der Kamerakennlinien aus Abbildung 2 zueinander. Die Grenzen des Dynamikumfangs verändern sich dabei jedoch nicht.

Für eine gute Korrektur aller Farben bietet sich eine Multiplikation in einem anderen Farbraum an [11], [10]. Dies führt zu einer besseren Wiederherstellung des Farbeindrucks, die Einschränkungen des Dynamikumfangs werden dabei jedoch nicht beeinflusst.

3.2 Optische Filter

Sowohl im Bereich der chemischen als auch digitalen Fotografie und Filmproduktion werden optische Filter zur Farbkorrektur eingesetzt. Spezielle Filter zur Farbkonversion können z.B. bei Halogenlicht als Filter vor der Kamera oder vor der Lichtquelle genutzt werden, um eine spektrale Verteilung ähnlich dem Tageslicht zu erreichen. Optische Filter verursachen jedoch einigen Aufwand und Kosten, da sie das Licht über das komplette Spektrum hinweg und damit auch bei den bereits lichtschwachen Farbkanälen reduzieren. Trotz der Nachteile sind diese Filter im Bereich der hochwertigen Medienproduktion auch heute noch im Einsatz.

3.3 Variable Belichtungszeit

Um eine ausgewogene Aussteuerung aller Kanäle zu erreichen, können die Belichtungszeiten der einzelnen Farbkanäle angepasst werden. Dies wurde beispielsweise in Scannern eingesetzt, die ein Bild in mehreren Durchläufen sequentiell erfassen [3]. Der Einsatz unterschiedlich langer Belichtungen für die Standbild-Fotografie ist in [2] beschrieben. In diesem Fall bewegen sich die Objekte gar nicht oder nur wenig und die Veränderungen sind so gering, dass die Szene ähnlich bleibt und nur vernachlässigbare Bewegungsunschärfe entsteht.

Über variable Belichtungszeiten ist es nun möglich den schwächsten Kanal unverändert zu lassen und damit die Empfindlichkeit der Kamera zu erhalten. In unserem Beispiel müssen die Belichtungszeiten der Kanäle Rot und Grün wie folgt angepasst werden: $\tau_r = \frac{k_r}{k_b} \tau_b$ und $\tau_g = \frac{k_g}{k_b} \tau_b$.

Dieses Verfahren funktioniert gut für unbewegte Szenen und Objekte oder sehr kurze Belichtungszeiten. Für die Bewegtbildaufnahme hingegen werden häufig Belichtungszeiten $\tau_{\text{exp}} = 0.5 \cdot \tau_{\text{frame}}$ gewählt, die bewusst einige Bewegungsunschärfen verursachen. Wie in [6] beschrieben ist dies ein erwünschter Effekt um einen flüssigen Bewegungseindruck zu erzeugen. Für diese Anwendung entstehen damit deutliche Farbartefakte an bewegten Objekten wie sie in Abbildung 7 c) zu sehen sind.

4 Digitales Neutraldichtefilter pro Farbkanal

Unter den optischen Filtern gibt es eine weitere Klasse der farbneutralen Filter. Sie werden als Neutraldichtefilter (ND-Filter) bezeichnet und sind ebenfalls weit verbreitet. Abhängig von der optischen Dichte d wird nur ein Bruchteil des Strahlflusses der Szene Φ_{scene} auf den Sensor Φ_{sensor} durchgelassen:

$$\Phi_{\text{sensor}}(t) \propto \frac{1}{10^d} \cdot \Phi_{\text{scene}}(t) \quad (3)$$

Im Bereich der Medienproduktion sind diese Filter häufig im Einsatz, da dort sowohl Blende als auch Belichtungszeit nicht zur Einstellung der Belichtung verwendet werden können. Die Festlegung von Tiefenschärfe und Belichtungszeit erfolgt aus künstlerischen Gesichtspunkten und eine Einstellung der Lichtmenge erfolgt dann über optische Filter. Leider bedeuten auch diese Filter einigen Aufwand in der Handhabung. In [8] haben wir ein Verfahren vorgeschlagen, das die optischen ND-Filter über eine digitale Realisierung ersetzen kann. Damit ist es möglich die Empfindlichkeit einer Kamera zu verringern und Blende sowie Belichtungszeit frei einstellbar zu lassen. Dies ermöglicht die Umsetzung des typischen Filmeindrucks ohne den Einsatz optischer Filter.

Das digitale ND-Filter arbeitet wie folgt (siehe Abbildung 4): An Stelle einer einzigen langen Belichtung werden N kurze Belichtungen in einem lückenlosen Sensor-Betriebsmodus

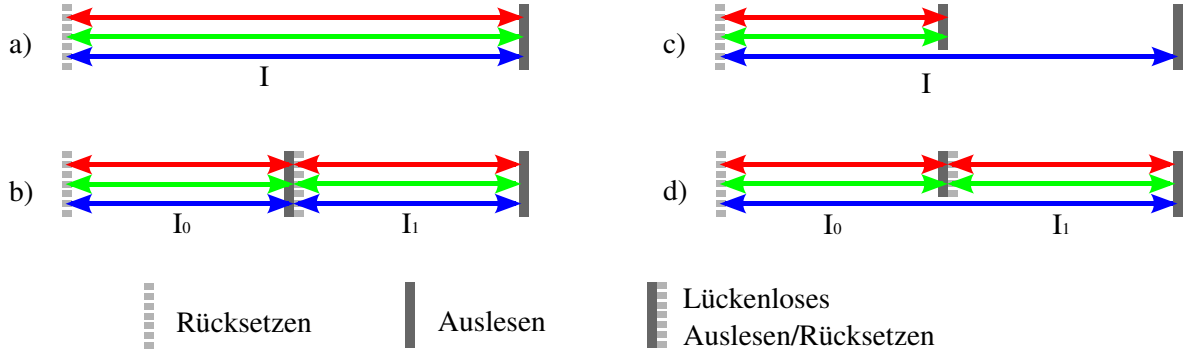


Abbildung 4: Digitales ND-Filter Auslesemuster: a) herkömmlicher Betrieb mit einer einzigen langen Belichtung, b) digitales ND-Filter mit $N = 2$ lückenlosen Auslesevorgängen während der ursprünglichen Belichtungszeit, c) reduzierte Belichtungszeit für die Kanäle Rot und Grün und d) vorgeschlagenes Verfahren mit digitalem ND-Filter für die Kanäle Rot und Grün mit $N_r = 2$ und $N_g = 2$

ausgelesen. Diese Reduktion von langen zu kurzen Belichtungszeiten führt zu einer Reduktion der Empfindlichkeit. Es kann nun ein N -fach höherer Strahlungsfluss von der Szene Φ_{scene} in jeder Einzelbelichtung I_n aufgenommen werden.

Eine einzelne kurze Einzelbelichtung würde zwar eine verringerte Empfindlichkeit aufweisen, sie hätte jedoch auch eine veränderte Bewegungsunschärfe. Wir mitteln daher alle N Belichtungen:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n \quad (4)$$

Dies garantiert, dass alle zeitliche Variation des Strahlungsflusses $\Phi_{\text{scene}}(t)$ während der ursprünglichen Belichtungszeit aufgenommen und im endgültigen Bild I enthalten ist.

Ein digitales ND-Filter mit $N = 2$ wird damit die obere Grenze des Dynamikumfangs um 3 dB (halbe Belichtungszeit) nach oben schieben. Der gesamte Dynamikumfang wird sich um etwa 1.5 dB vergrößern, da das unkorrelierte Bildrauschen sich nur um $\sqrt{2}$ vergrößert.

4.1 Digitales ND-Filter für Weißabgleich

Dieses angepasste Ausleseraster mit Verrechnung wird nun auf einen Teil der Farbkanäle angewendet. Für jeden Farbkanal wird eine eigene Unterteilung $N_{(c)}$ eingeführt. Die Unterteilung der Belichtung eines Kanals in $N_{(c)}$ lückenlose kurze Belichtungen führt zu einer Reduktion der Empfindlichkeit des Kanals. Der schwächste Farbkanal (in unserem Beispiel Blau) sollte dabei nicht verändert werden. Dies garantiert, dass die Empfindlich-

keit des Systems unverändert bleibt. Über die Parameter $N_r = 2$, $N_g = 2$ und $N_b = 1$ erreichen wir eine Abschwächung der Kanäle Rot und Grün.

Da N als ganzzahliger Parameter verwendet wird, kann über dieses Verfahren nur eine Teil-Korrektur erreicht werden. Eine zusätzliche multiplikative Korrektur bleibt in vielen Fällen weiterhin nötig. Die verbleibenden Faktoren müssen wie folgt angepasst werden:

$$\tilde{k}_{(c)} = k_{(c)} \cdot \frac{N_{(c)}}{\max(N)} \quad (5)$$

Für das gezeigte Beispiel ($N_r = 2$, $N_g = 2$ und $N_b = 1$) ergeben sich neue Korrekturfaktoren zu $\tilde{k}_r = 1.3$, $\tilde{k}_g = 1$ und $\tilde{k}_b = 1.16$ wie in Abbildung 7 d) und e).

Die Umsetzung in einem Kamerasystem erfordert einen Bildsensor in dem ein Auslesen und Rücksetzen bestimmter Bildpunkte unabhängig von der Belichtung in anderen Bildpunkten möglich ist. Übliche CMOS Sensoren bieten diese Funktion, jedoch in der Gruppierung fester Bildzeilen. Eine Gruppierung entsprechend der Farbmaske hingegen ist in heutzutage kommerziell erhältlichen Bildsensoren noch nicht verfügbar. Für zukünftige Sensoren sind wir jedoch überzeugt, dass eine Umsetzung mit geringfügigen Anpassungen der Ausleseschaltung möglich ist.

5 Experimentelle Ergebnisse

Wir haben drei verschiedene Experimente durchgeführt, die die Wirksamkeit des vorgeschlagenen Verfahrens zeigen:

Die Ergebnisse für den Dynamikumfang wurden anhand von Kamerakennlinien und einer Beleuchtung von $T = 3000$ K ermittelt. In Abbildung 5 a) ist der gemessene Dynamikumfang für den herkömmlichen Betrieb gezeigt. Der gemessene Dynamikumfang für den Betrieb mit digitalem ND-Filter und $N = 2$ ist dann in Abbildung 5 b) zu sehen. Man erkennt, dass der Dynamikumfang um etwa 1.5 dB gestiegen ist und gleichzeitig um 3 dB hin zu größeren Intensitäten verschoben wurde. Eine Kombination wie in Abbildung 5 c) kann den Versatz vergrößern und damit aus einem vergrößerten Dynamikumfang Teilinformation aufnehmen. Die nach unserer Definition nutzbare Dynamik verringert sich jedoch. In Abbildung 5 d) sehen wir die Kombination einer herkömmlichen Belichtung für den Kanal Blau und der digitalen ND Belichtung für die Kanäle Rot und Grün. Die Dynamikbereiche überlappen nun deutlich besser und der nutzbare Dynamikumfang hat sich um 3 dB oder eine Blendenstufe vergrößert.

Weiterhin sind Verluste und Gewinne für verschiedene Farbtemperaturen in Abbildung 6 dargestellt. Unsere Beispielkamera wurde über einen weiten Bereich an typischen Farbtemperaturen untersucht. Das Verhalten bei einer herkömmlichen Aufnahme ist durch eine schwarze Linie dargestellt. Es ergibt sich ein Verlust an Dynamikumfang zwischen 2 und 4 dB. Im Mittel über alle Farbtemperaturen ergibt sich ein Verlust von 2.6 dB. Die weiteren Linien zeigen die Auswirkungen einer Reduktion der Empfindlichkeit bestimmter Farbkanäle. Je nach Farbtemperatur der Szene ist es günstiger eine Unterteilung für

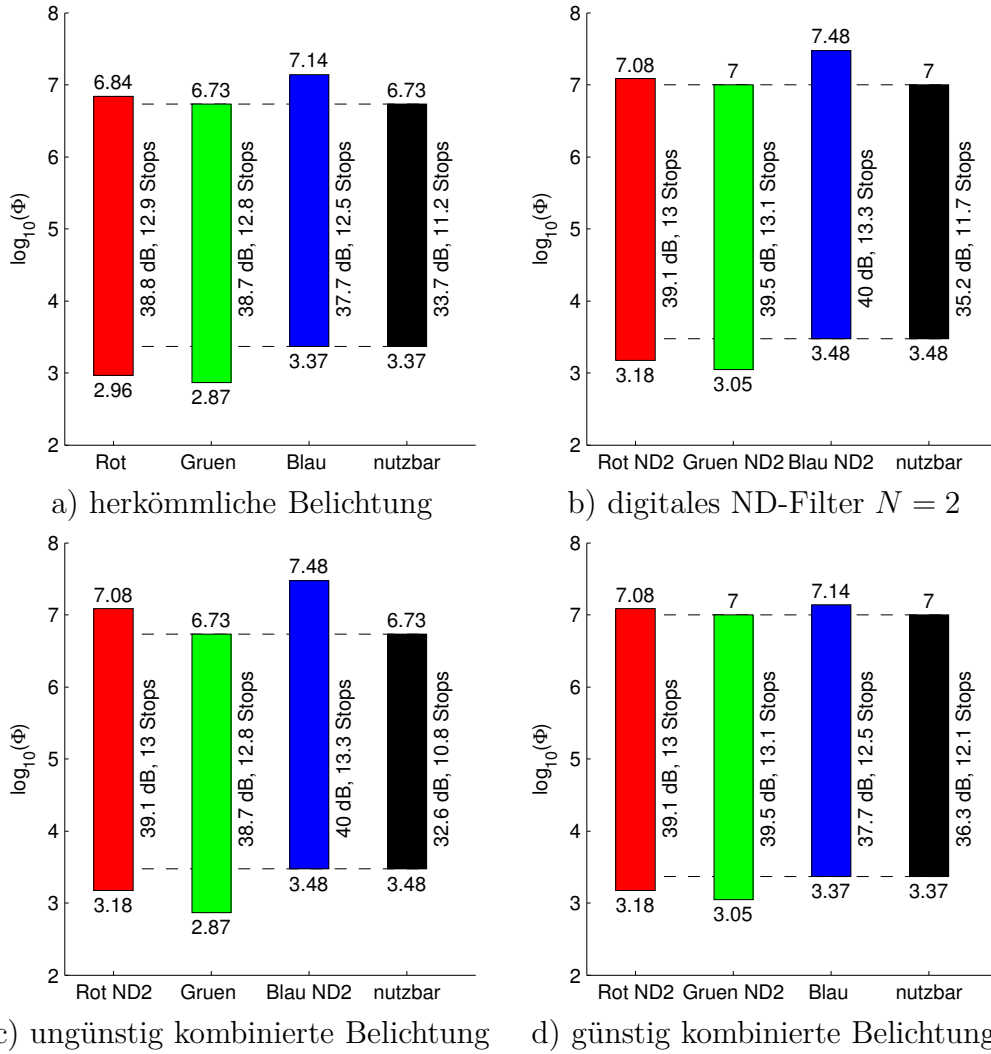


Abbildung 5: Dynamikumfang bei $T = 3000$ K: a) Dynamikumfang einer herkömmlichen Belichtung, b) veränderte Dynamik durch Anwendung des digitalen ND-Filters ($N = 2$) in allen Kanälen, c) verringerte Dynamik durch ungünstige Kombination $N_r = 2$ und $N_b = 2$ und d) verbesserte Dynamik durch digitales ND-Filter für Rot und Grün mit $N_r = 2$ und $N_g = 2$

die Kanäle Rot und Grün (niedrige Farbtemperaturen, blaue Linie), den Kanal Grün bei mittleren Farbtemperaturen (grüne Linie) oder Grün und Blau bei hohen Farbtemperaturen (rote Linie) durchzuführen. Gegenüber einer einzelnen langen Belichtung aller Kanäle können wir in allen Fällen einen Gewinn an Dynamikumfang erreichen. Eine Kamera kann nun durch eine einstellbare Farbtemperatur oder die Messung der Lichtsituation in einer vorherigen Aufnahme die jeweils günstigste Kombination auswählen. Besonders hohe Ge-

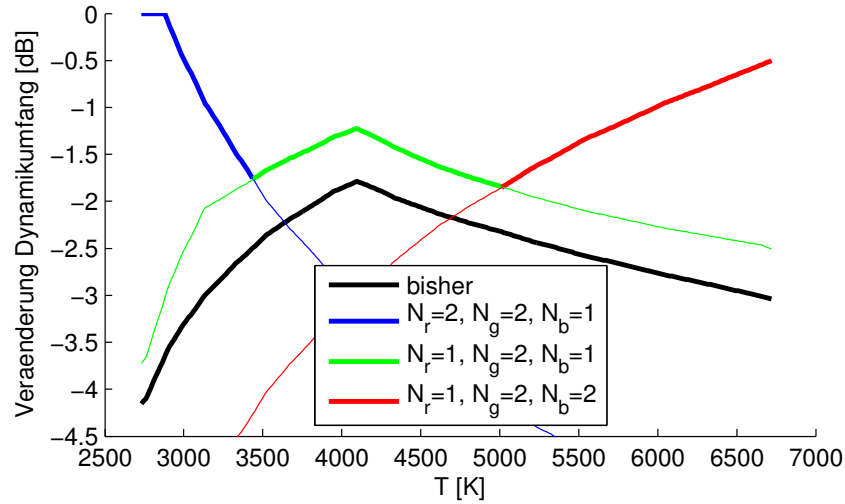


Abbildung 6: Dynamikumfang über die Farbtemperatur T für Beispielkamera, Verlust und Erweiterung des Dynamikumfangs durch Anwendung des digitalen ND-Filters

winne erreichen wir in der Beispielkamera für Randbereiche typischer Farbtemperaturen. Im Mittel können wir einen Gewinn von 1.3 dB verzeichnen.

Die visuellen Auswirkungen auf eine horizontal bewegte Szene sind in Abbildung 7 für eine Beleuchtung mit $T = 3000$ K gezeigt. Eine herkömmliche Belichtung sieht man in Abbildung 7 a). Ein starker Farbstich ist in diesem unkompensierten Beispiel zu sehen. Die gelblichen Falschfarben im linken oberen Eck zeigen, dass einige Kanäle bereits überbelichtet sind. Das Beispiel in Abbildung 7 b) zeigt die Ergebnisse einer multiplikativen Korrektur. Es entsteht ein farbneutraler Eindruck nach der Korrektur, die überbelichteten Stellen im Bild haben jedoch keine weitere Information hinzu erhalten. Abbildung 7 c) zeigt die Verringerung der Belichtungszeit für die Kanäle Rot und Grün. Dies erzeugt ebenfalls einen plausiblen Weißpunkt, durch die horizontale Bewegung sind jedoch an den vertikalen Kanten deutliche Farbartefakte entlang der Bewegungsunschärfe zu sehen. Abbildung 7 d) verwendet das digital ND-Filter in allen Kanälen zur Reduktion der Empfindlichkeit. Die Bereiche links oben sind jetzt nicht mehr überbelichtet. In Abbildung 7 e) ist das vorgeschlagene Verfahren mit der Reduktion der Empfindlichkeit für die Kanäle Rot und Grün gezeigt. Sie gleichen nun sehr gut dem Dynamikumfang des Kanals Blau. Da für diese Korrektur nur ganzzahlige Werte von N zum Einsatz kommen führt dies zu einer geringen Überkompensation. Eine zusätzliche multiplikative Anpassung mit kleinen Faktoren führt dann zu einem neutralen Weiß wie in Abbildung 7 f) zu sehen ist.

6 Schlussfolgerung

Heutige Bildsensoren besitzen eine feste spektrale Empfindlichkeit. Je nach Beleuchtung werden die Kanäle nicht gleichmäßig angesteuert und es ergibt sich eine Reduktion des nutzbaren Dynamikumfangs. Dieser kann nach der Aufnahme mit herkömmlichen Algorithmen zum Weißabgleich nicht mehr kompensiert werden. Nur ein Ausgleich während der Aufnahme kann diesen Verlust reduzieren. Wir schlagen ein neues Verfahren vor, das während der Aufnahme eine selektive Reduktion der Sensorempfindlichkeit über ein digitales Neutralfilter (ND-Filter) ermöglicht. Damit ist es möglich die Bewegungsunschärfe zu erhalten und die Farbkanäle besser aneinander anzupassen. Der nutzbare Dynamikumfang steigt im Mittel um 1.3 dB, für bestimmte Fälle um bis zu 4 dB. Die Experimente zeigen, dass das vorgeschlagene Verfahren keine Störungen selbst in bewegten Szenen und bei langen Belichtungszeiten erzeugt. Im Gegensatz zur variablen Belichtungszeit ist das vorgeschlagene Verfahren damit auch für die hochwertige Medienproduktion einsetzbar. Die Aufnahme von Szenen mit vergrößertem Dynamikumfang und bei beliebigen Beleuchtungen wird durch geringen Zusatzaufwand ermöglicht.

Literatur

- [1] BARNARD, K., V. CARDEI und B. FUNT: *A comparison of computational color constancy algorithms. I: Methodology and experiments with synthesized data*. IEEE transactions on Image Processing, 11(9):972–984, 2002.
- [2] BELL, T. und C. BELL: *Method and apparatus for programmable color balance in an image sensor*, September 12 2006. US Patent 7,106,372.
- [3] PARULSKI, K.A., G. GEISBUESCH und J.C. RUTTER: *Color sequential scanner incorporating a synchronized variable exposure shutter*, Oktober 5 1993. US Patent 5,251,021.
- [4] PETSCHNIGG, G., R. SZELISKI, M. AGRAWALA, M. COHEN, H. HOPPE und K. TOYAMA: *Digital photography with flash and no-flash image pairs*. ACM Transactions on Graphics (TOG), 23(3):664–672, 2004.
- [5] QUAN, SHUXUE, NOBORU OHTA und XIAOYUN JIANG: *A Comparative Study on Sensor Spectral Sensitivity Estimation*. In: *SPIE Color Imaging VIII: Processing, Hardcopy, and Applications*, Band 5008, Seiten 209–220. SPIE, 2003.
- [6] SCHÖBERL, M., S. FÖSSEL, H. BLOSS und A. KAUP: *Modeling of Image Shutters and Motion Blur in Analog and Digital Camera Systems*. In: *Proc. International Conference on Image Processing (ICIP)*, Cairo, Egypt, November 2009.

- [7] SCHÖBERL, M., S. FÖSSEL und A. KAUP: *Fixed Pattern Noise Column Drift Compensation (CDC) for Digital Moving Picture Cameras*. In: *Proc. International Conference on Image Processing (ICIP)*, Hong Kong, September 2010.
- [8] SCHÖBERL, M., A. OBERDÖRSTER, S. FÖSSEL, H. BLOSS und A. KAUP: *Digital Neutral Density Filter for Moving Picture Cameras*. In: *SPIE Electronic Imaging, Computational Imaging VIII*. SPIE, 1 2010.
- [9] SCHÖBERL, M., C. SENEL, S. FÖSSEL, H. BLOSS und A. KAUP: *Non-linear Dark Current Fixed Pattern Noise Compensation for Variable Frame Rate Moving Picture Cameras*. In: *Proc. 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Seiten 268–272, Glasgow, Scotland, United Kingdom, 8 2009.
- [10] VIGGIANO, J.A.S.: *Comparison of the accuracy of different white balancing options as quantified by their color constancy*. SPIE Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications V, 5301:323–333, 2004.
- [11] XIAO, F., J.E. FARRELL, J.M. DICARLO und B.A. WANDELL: *Preferred color spaces for white balancing*. In: *SPIE Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications IV*, Band 5017, Seiten 342–350. SPIE, 2003.
- [12] ZARAGA, F. und G. LANGFELDER: *White balance by tunable spectral responsivities*. Journal of the Optical Society of America A, 27(1):31–39, 2010.

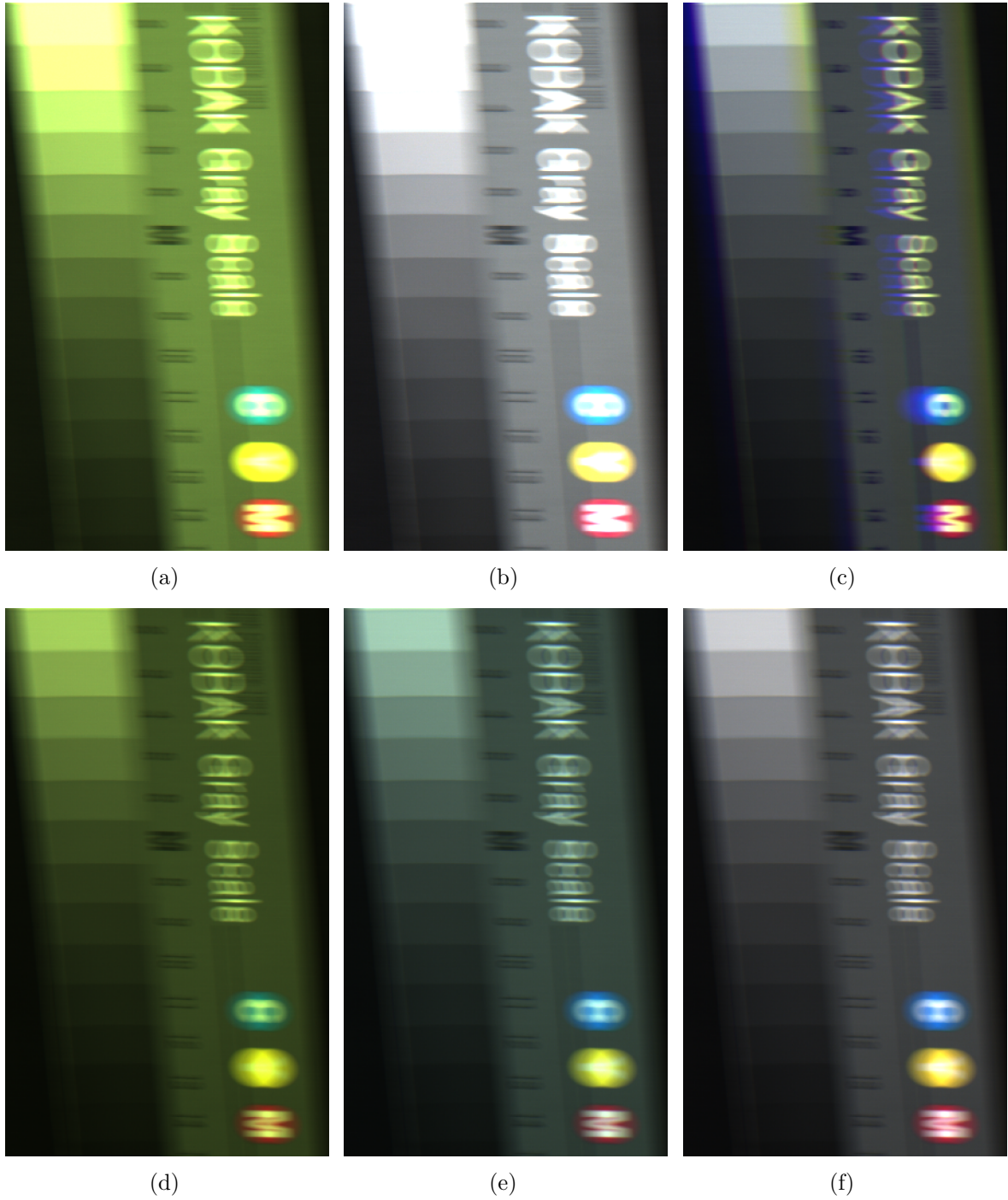


Abbildung 7: Beispiele für ein horizontal bewegtes Objekt mit einer Beleuchtung von $T = 3000$ K: a) herkömmliche Belichtung ohne Kompensation, b) multiplikative Kompensation mit $k_r = 1.3$, $k_g = 1$ und $k_b = 2.3$, c) angepasste Belichtungszeiten pro Farbkanal mit $\tau_g = 0.4 \cdot \tau_b$ und $\tau_r = 0.53 \cdot \tau_b$, d) digitales ND-Filter für alle Kanäle e) digitales ND-Filter für Rot und Grün mit $N_r = 2$, $N_g = 2$ und f) wie e) mit zusätzlicher multiplikativer Korrektur $k_r = 1.3$, $k_g = 1$ und $k_b = 1.16$