

Leuchtdichtemessung vor Ort mit der Digitalkamera

Tim Hoger

© 2009 by ITAI + EVU

Zusammenfassung

Vergleichsmessungen zwischen einer Nikon D 200 und einem Leuchtdichtemessgerät ergeben, dass aus der Kenntnis der kameraspezifischen Kalibrierkurve die Leuchtdichteverteilung in weiten Bereichen aus dem digitalen Bild rekonstruierbar ist. An der Örtlichkeit lassen sich auf diese Weise schnell, effizient und preiswert die Lichtverhältnisse aufnehmen und später am Computer auswerten. Zur Auswertung kann ein handelsübliches Graphikprogramm verwendet werden oder eine hierfür entwickelte Software.

Einleitung

Im Bereich der Digitalfotografie wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. Noch vor etwa 10 Jahren standen lediglich lichtschwache Bildsensoren mit 480×640 Bildpunkten zur Verfügung. Heute werden effiziente Bildsensoren mit über 12 Millionen Bildpunkten in lichtstarken Spiegelreflexkameras verbaut, die eine Dynamik von 12 bit aufweisen, sodass die digitale Bildaufnahme in vielen Bereichen die analoge bereits abgelöst hat. Auch Leuchtdichtemesskameras sind bereits erhältlich, allerdings für die Anwendung bei lichttechnischen Untersuchungen aufgrund ihres hohen Preises weiterhin kaum eine Alternative zu herkömmlichen, punktweise arbeitenden Leuchtdichtemessgeräten.

Auf der anderen Seite verlangt die Komplexität des menschlichen Sehens nach einer orts aufgelösten Messung, d. h. nach der Erfassung der Leuchtdichteverteilung und nicht nur einzelner Punkte, um beispielsweise die Blendung oder Erkennbarkeit beurteilen zu können. Dies wird zum Anlass genommen, lichttechnische Untersuchungen noch einmal unter dem Aspekt der digitalen Bildaufnahme mit einer handelsüblichen Spiegelreflexkamera zu analysieren. Möglichkeiten und Probleme werden am Beispiel einer Ni-

kon D 200, Abb. 1a, mit einem Festbrennweitenobjektiv der Firma Sigma (30 mm, 1:1,4) aufgezeigt und mit Messungen aus einem Leuchtdichtemessgerät, Abb. 1b, verglichen.

Grundlagen

Die Benutzung einer Digitalkamera als Messgerät erfordert das Verständnis ihrer Technik, um mögliche Fehlerquellen erkennen und deren Größe bestimmen zu können. Deshalb wird zunächst kurz in die Grundelemente der Digitalfotografie eingeführt.

Die Belichtung in einer Kamera erfolgt durch das Objektiv und kann über die Blende und über die Belichtungszeit eingestellt werden. Die Lichtstärke LS eines Objektivs berechnet sich aus der Eintrittsöffnungsweite d und Brennweite f gemäß

$$LS = \frac{d}{f} = \frac{30 \text{ mm}}{42 \text{ mm}} = 0,71. \quad (1)$$

Das Inverse der Lichtstärke

$$\hat{B} = \frac{1}{LS} = 1,4 \quad (2)$$

bezieht den Einstellwert \hat{B} der größtmöglichen Blendenöffnung, d. h. den kleinsten einstellbaren



a) Digitalkamera Nikon D 200



b) Leuchtdichtemessgerät LMT

Abb. 1: Leuchtdichtemessgeräte

Wert der Blende B . Je größer B , desto geringer ist die Strahlungsenergie Q auf dem Sensor. Um eine große Empfindlichkeit zu erhalten, sollte B möglichst klein sein, sprich die maximale Eintrittsöffnungsweite gewählt werden. Dies ist in der Praxis jedoch nicht uneingeschränkt günstig, da Linsenfehler bei Randstrahlen, also Strahlen fern der optischen Mittelachse, stark zunehmen (sphärische Abberation) und das Bild aufgrund der dann schlechten Tiefenschärfe unscharf werden lassen.

Innerhalb einer Blendenreihe sind zwei aufeinander folgende Einstellungen so gewählt, dass sie die doppelte Strahlungsenergie durch lassen. Hieraus ergibt sich, dass bei einer kreisförmigen

Eintrittsfläche A mit

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (3)$$

eine Verdopplung der Eintrittsfläche ($A' = 2A$) für die Eintrittsöffnungsweite innerhalb einer Blendenreihe

$$d' = \sqrt{2}d \quad (4)$$

folgt. Die zweite Einflussgröße der Belichtung ist die Belichtungszeit t . Je länger belichtet wird, desto mehr Licht fällt auf den Sensor, aber es nimmt auch die Verwacklungsgefahr, die Unschärfe durch Kamera- oder Objektbewegung, zu. Die auf den Sensor auftreffende Strahlungsenergie ist somit einerseits proportional zur Belichtungszeit und andererseits invers proportional zum Quadrat der Blende

$$Q \propto \frac{t}{B^2}. \quad (5)$$

Werden die Belichtungszeit und die Blende fest vorgegeben, kann man einen zur Leuchtdichte eines Objekts proportionalen Grauwert in seinem Digitalbild erwarten.

Der Sensor in einer Digitalkamera besteht üblicherweise aus einer CCD-Matrix (engl. *charge-coupled device*). Jeder Punkt der Matrix wandelt durch den Photoeffekt eintreffendes Licht in Ladung um. Diese Ladung wird in Potentialtöpfchen zwischengespeichert. Durch geschickte Variation der Potentiale benachbarter Töpfe lassen sich die Ladungen zum Rand der Matrix leiten. Dort werden sie verstärkt (Iso-Einstellung), in einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert und dem einzelnen Punkt zugeordnet.

In der Nikon D 200 wird ein von Sony gefertigter $23,6 \times 15,8$ mm großer Sensor mit $3872 \times 2592 = 10\,036\,224$ Bildpunkten verwendet. Die Dynamik von 12 bit führt zu einer Dateigröße im RAW-Format von $10\,036\,224 \times 12 / 8$ Byte = 15,3 MB. Die große Anzahl der Bildpunkte ermöglicht es, für die zu messende Leuchtdichte mehrere Bildpunkte zusammenzufassen, um den Fehler des einzelnen Bildpunktes zu reduzieren.

Günstige, handelsübliche Leuchtdichtemessgeräte, so etwa das Minolta LS-100, haben eine

Auflösung von einer Winkelminute, was in der Kamera einer Fläche von etwa 800 Bildpunkten entspricht. Durch die Mittelung über 800 Einzelpunkte lässt sich der Fehler gegenüber der Messung mit einem einzelnen Bildpunkt etwa einen Faktor 30 senken.

Die Helligkeit eines Bildpunktes, also dessen Grauwert, kann durch verschiedene Faktoren verfälscht werden. So müssen drei unterschiedliche Arten des Rauschens berücksichtigt werden, nämlich signalunabhängiges Rauschen, signalabhängiges Rauschen und Digitalisierungsrauschen. Streulicht innerhalb des Objektivs und Überbelichtung einzelner Bildpunkte führt zum Übersprechen auf benachbarte Bildpunkte.

Ein »nackter« CCD-Sensor registriert in erster Linie Beleuchtungsstärken auf der Einzelzelle und kann keine Farbeindrücke aufnehmen. Um trotzdem ein Farbbild konstruieren zu können, wird in der Kamera ein Farbfilter vor jeden Bildpunkt gesetzt, der rot, grün oder blau transmittiert (sog. Bayer Filter). Um einen ähnlichen Farbeindruck zu generieren wie das menschliche Auge, das besonders grün-empfindlich ist, wird die Anzahl der grün-transmittierenden Filter doppelt so hoch gewählt wie die der blau- beziehungsweise rot-transmittierenden Filter. Eine genaue Anpassung an die Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges ($V(\lambda)$ -Anpassung) besteht allerdings nicht.

Unterschiedliche Sensortemperaturen resultieren sowohl in signalabhängigem als auch in signalunabhängigem Rauschen (Temperaturkoeffizient des Sensors). Ist die Aufnahmezeit im Vergleich zu pulsierenden Lichtquellen kurz, können Fehler durch die Modulation des Lichts entstehen. Alle diese Eigenarten beeinflussen die Verwertbarkeit der digitalen Aufnahme.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es festzustellen, ob (und gegebenenfalls mit welchen Einschränkungen) trotz aller Fehlerquellen aus der Digitalaufnahme die Leuchtdichteverteilung abgeleitet werden kann.

Einstellung	Wert
Iso	100
Bildoptimierung	normal
Belichtungssteuerung	manuell
Belichtungszeit	1 s
Blende	1:5
Tonwertkorrektur	aus
Scharfzeichnen	aus
Weißabgleich	5000 K
Farbsättigung	0
Farbtonkorrektur	0°

Tab. 1: Parameter für die manuelle Kameraeinstellung

Experimentelle Durchführung

Alle automatischen Einstellungen an der D 200 wurden auf manuell gesetzt beziehungsweise ausgeschaltet und entsprechend Tabelle 1 eingestellt. Auf einem TFT-Monitor wurden verschiedene Grautöne eingblendet und mit einem Leuchtdichtemessgerät aus einem Abstand von 3,3 m vermessen. Anschließend wurde der Monitor bei verschiedenen Blenden und Belichtungszeiten fotografiert. Das so generierte Messbild im RAW-Format wird mit der mitgelieferten Software »Nikon View« in ein TIFF konvertiert, um es für Grafikprogramme lesbar zu machen. Dabei werden jedoch Veränderungen am Bild vorgenommen.

Der in der D 200 verbaute CCD-Sensor liefert eine nahezu lineare Kennlinie. Um einen realistischen Helligkeitseindruck des Bilds entstehen zu lassen werden bei der Transformation in ein TIFF-Bild die Grauwerte mit einer Exponentialfunktion gewichtet. Bei Bildern im JPEG-Format wird das bereits in der Kamera durchgeführt. Diese Gewichtung trägt dem logarithmischen Helligkeitseindruck des Auges Rechnung.

Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 2 ist die gemessene Leuchtdichte gegen den Grauwert für verschiedene Belichtungszeiten zwischen 0,2 s (schwarze Quadrate) und 0,5 s (weiße Quadrate, schwarz umrandet) aufgetragen. Graue Rhomben stellen die normale

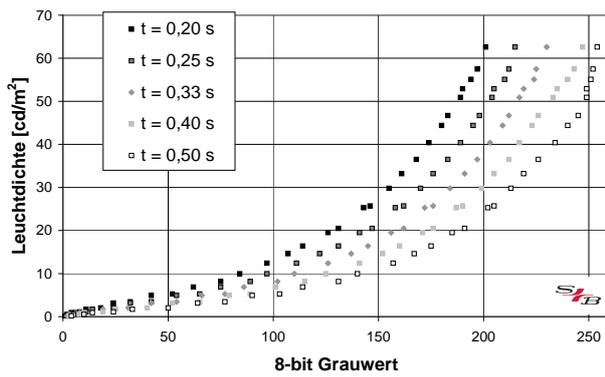


Abb. 2: Messwerte der Leuchtdichte gegen den Grauwert

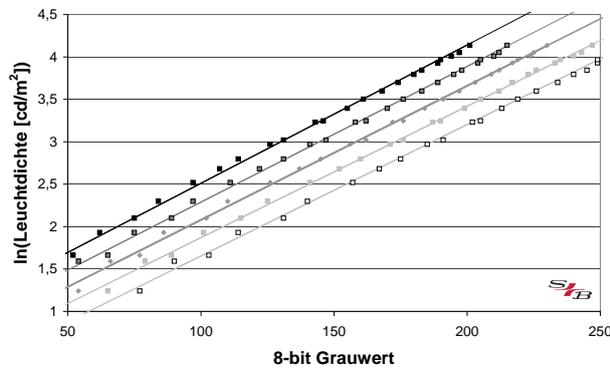


Abb. 3: Linearität der Grauwerte im Bereich zwischen $3,5 - 62,9 \text{ cd/m}^2$

Belichtung dar. Die darüber liegende Kurve ist leicht unterbelichtet, die darunter liegende Kurve ist leicht überbelichtet. Schwarze Messpunkte sind stark unterbelichtet, weiße Messpunkte stark überbelichtet.

Die gemessenen Leuchtdichten L variieren zwischen $0,18 \text{ cd/m}^2$ und $62,6 \text{ cd/m}^2$. Der Grauwert ist in einer 8-bit-Dynamik dargestellt, da zur Verfügung stehende Auswertungsprogramme üblicherweise noch keine 12-bit-Dynamik unterstützen. Man erkennt die exponentielle Zunahme der Leuchtdichte mit dem Grauwert. Abb. 4 zeigt die Messwerte aus Abb. 3 in halb-logarithmischen Darstellung.

Offensichtlich lassen sich die Grauwerte G für verschiedene Belichtungszeiten in einem weiten Grauwertbereich von etwa 50 bis 250 durch eine

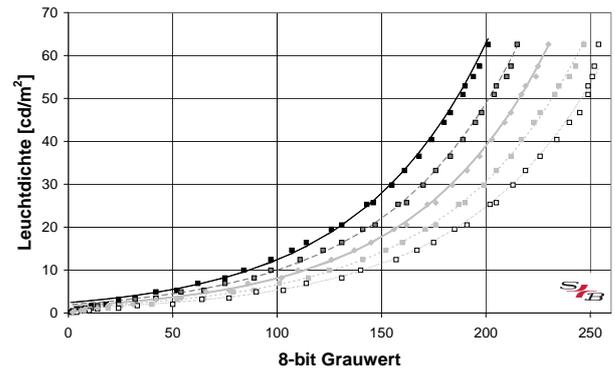


Abb. 4: Messwerte mit Kalibrierfunktion

lineare Funktion der Form

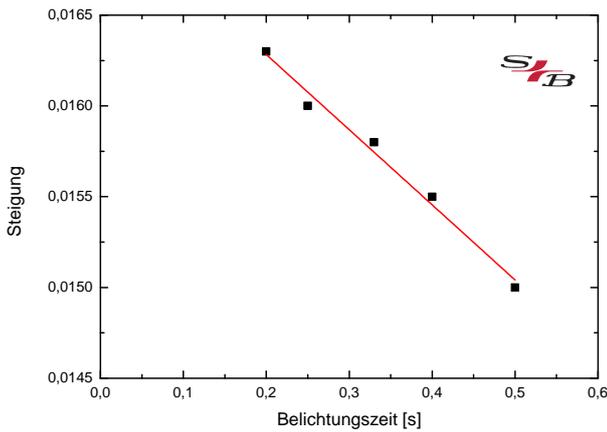
$$\ln(L) = aG + b \quad (6)$$

anpassen. Hierzu werden zwei Anpassungsparameter a (Steigung) und b (Offset) eingeführt. Die Leuchtdichte kann direkt aus dem Grauwert mit Hilfe dieser Parameter bestimmt werden und ist in Abb. 5 zusammen mit den Messdaten abgebildet.

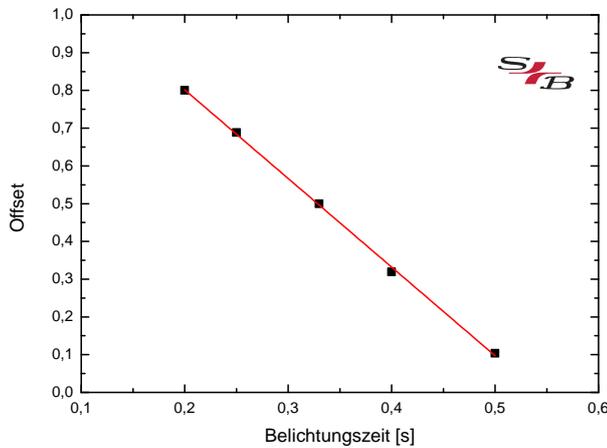
Die angepasste Kurve gibt die Messwerte zufriedenstellend wieder. Die Kenntnis der Kalibrierfunktion ermöglicht somit in einem weiten Leuchtdichtebereich die Rekonstruktion der Leuchtdichteverteilung. Abweichungen bei geringen Bildhelligkeiten lassen sich durch längere Belichtung oder kleinere Blenden beheben, um Nichtlinearitäten zu umgehen. Bei Leuchtdichten von $20 - 25 \text{ cd/m}^2$ weichen alle fünf Kurven in gleicher Weise von den Messpunkten ab. Daraus lässt sich schließen, dass eine ungenaue Messung der Leuchtdichte mit Hilfe des Leuchtdichtemessgeräts die Abweichung mit verursacht und nicht nur die Digitalkamera. Somit wird der Fehler aus der Standardabweichung überschätzt.

Aus der bloßen Kenntnis einer beliebigen Kalibrierfunktion lässt sich im Versuch auch die Leuchtdichteverteilung für ähnlich belichtete Bilder rekonstruieren. Ist die Kalibrierung für eine Belichtungszeit bekannt, kann die Steigung a der Kalibrierungskurve für andere Belichtungszeiten extrapoliert werden, Abb. 5a.

Abb. 5b stellt die gleiche Methode für den Offset b dar. Auch der Offset ist nach dieser Methode



a) Steigung



b) Offset

Abb. 5: Ermitteln der Parameter für andere Belichtungszeiten

extrapolierbar. Hieraus kann geschlossen werden, dass die bloße Kenntnis aus *einer* Kalibrierung ausreicht, um auf andere Belichtungszeiten und Blenden umrechnen zu können.

Die Kalibrierungsfunktion ist auch auf andere Bilder übertragbar, zeitlich somit unter normalen Umständen (keine zu großen thermischen Schwankungen) stabil. Die Abb. 6 zeigt Messungen an verschiedenen Tagen mit unterschiedlichen Lichtverhältnissen. Schwarze Quadrate geben die Leuchtdichte aus der Messung mit dem Leuchtdichtemessgerät an (zum Grauwert der Kamera), rote Kreise stellen die Ergebnisse aus der Kalibrierfunktion dar.

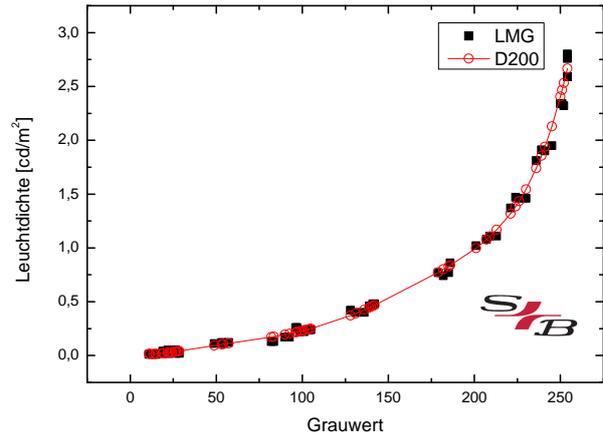


Abb. 6: Messwerte bei verschiedenen Randparametern

Abweichungen bei hohen Grauwerten entstehen durch softwareseitige Dämpfung der überbelichteten Bereiche. Es ist somit auch eine absolute Kalibrierung möglich. Bei der Aufnahme der Bilder müssen allerdings einige Faktoren beachtet werden. So dürfen die Bilder z. B. nicht stark über- oder unterbelichtet werden; Randbereiche des Bildes sollten wegen der Abschattungseffekte (*Shading*) nicht berücksichtigt werden.

Bildauswertung

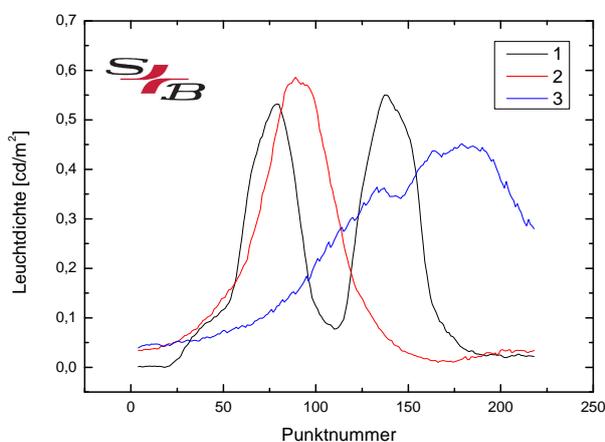
Die Auswertung des Digitalbilds kann mithilfe der Kalibrierungsfunktion in einem Graphikprogramm erfolgen. Diese punktweise Auswertung ist jedoch zeitaufwändig, da zu jedem Messpunkt der Grauwert bestimmt und dieser in die entsprechende Leuchtdichte umgerechnet werden muss. Einfacher gestaltet sich die Auswertung mithilfe eigens hierfür entwickelten Software.

Abb. 7a zeigt das Bild eines auf der Straße stehenden Fußgängers. Verschiedene Bereiche wurden im Bild durch Rechtecke markiert. Der erste Bereich umfasst die Schienbeine des Fußgängers, der zweite Bereich den Mittelstreifen und der dritte Bereich den Randstreifen. Die im Programm hinterlegte Kalibrierfunktion ermöglicht die direkte Ausgabe der horizontalen Leuchtdichteverteilung, Abb. 7b.

Der Verteilung 1 (schwarze Kurve) kann ei-



a) Foto



b) Auswertung

Abb. 7: Leuchtdichtemessung mit Kamera vor Ort

ne Leuchtdichtedifferenz von etwa $0,5 \text{ cd/m}^2$ entnommen werden. Die Leuchtdichtedifferenz des Mittelstreifens (rote Kurve) ist leicht höher. Die Leuchtdichte des Seitenstreifens erscheint geringer, da innerhalb des Messrechtecks eine vertikale Mittelung der Leuchtdichten erfolgt.

Schlussfolgerung

Aus einem digitalen Bild kann – unter Beachtung einiger Parameter – die Leuchtdichteverteilung generiert werden. An der Örtlichkeit lassen sich auf diese Weise schnell, effizient und preiswert die Lichtverhältnisse aufnehmen und später am Computer auswerten. Nicht nur in Situatio-

nen, in denen die langwierige Aufnahme von Einzelmesspunkten schwierig bis unmöglich ist (wie zum Beispiel während der Dämmerung) bietet dieses Verfahren Vorteile.

Zusätzlich ermöglicht die Kenntnis der Leuchtdichteverteilung Aussagen vor allem in Situationen, in denen keine scharfen Konturen vorgegeben haben könnten, zum Beispiel bei Nebel, Nieselregen oder einfach durch eine schmierige Windschutzscheibe oder ein verkratztes Visier. Die gesamte Auswertung wird beschleunigt und besser nachvollziehbar.

Kontakt

Dr. Tim Hoger
 Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke
 Münsterstraße 101
 D - 48151 Münster, Germany
 hoger@ureko.de