

Einfach **scharf!**

Grundlagen der Bildverarbeitung: Kontrast und Schärfe

Ob ein optisches System – und damit auch das Objektiv eines Bildverarbeitungssystems – bestimmte Details einer Szene „scharf“ abbilden wird, kann man anhand der sog. Modulations-Übertragungsfunktion (MTF, modulation transfer function) beurteilen. Diese Erkenntnis aus der Systemtheorie nützt jedoch einem Techniker, Betriebsingenieur oder Betriebsleiter wenig, der an der Linie steht und sich fragt: Wie kann ich „das Bild scharf stellen“? In diesem Artikel werden einige Begriffe erläutert, die mit dieser Fragestellung zusammenhängen. Wer mag, kann anschließend seine Bildverarbeitungsapplikation um eine Routine erweitern, die ein Gütemaß für die Bildschärfe ausgibt oder eine Autofokus-Funktion implementieren.

Jeder digitale Photoapparat, der sich auf dem Consumer-Markt behaupten will, nimmt dem Kunden das „Scharfstellen“ per „Autofokus“ ab. Bei Bildverarbeitungssystemen für industrielle Anwendungen ist diese Funktionalität jedoch keineswegs allgemein üblich. Ein wesentlicher Grund für diesen, auf den ersten Blick verblüffenden, Zustand ist die Tatsache, dass bei industriellen Anwendungen der Abstand zwischen Kamera und Objektebene meist mechanisch gut definiert ist. Daher genügt es, beim Einrichten der Anlage einmalig für die ausreichende Abbildungsqualität zu sorgen. Anwender sind gut beraten, die dabei festgelegte Einstellung des Objektivs gegen Veränderungen zu schützen, die z. B. durch Vibrationen oder durch Hantieren in der Anlage entstehen können. Objektive für industrielle Anwendungen haben zu diesem Zweck häufig spezielle Feststellschrauben oder sind in Käfigen montiert. Schwankungen der Gegenstandsweite sind zwar auch bei Industrieanwendungen oft unvermeidbar, beispielsweise bei Zuführung der Teile mit einem Förderband, die Auswirkung einer Abweichung von der optimalen Gegenstandsweite auf die Schärfe im Bild hängt jedoch davon ab, wie weit die Blende des Objektivs geöffnet ist. Wenn die Beleuchtung ausreichend hell ist, kann die Blende weitgehend zugezogen werden, und die Schärfentiefe ist groß, d. h. die Abbildung ist auch dann noch scharf, wenn das Objekt längs der optischen Achse um eine bestimmte Strecke verschoben wird. Muss die Blende jedoch weit geöffnet werden, kann der Schärfentiefebereich sehr schmal sein, unter Umständen nur wenige Millimeter. Wer eine Anwendung

plant, die in dieser Hinsicht robust sein muss, sollte sich daher um eine intensive Beleuchtung kümmern.

Schärfentiefe und Blende

Die Abhängigkeit der Schärfentiefe von der Blende ist nützlich, wenn man die Abbildung manuell „scharf“ einstellen möchte. Dazu wird zunächst die Blende weit geöffnet und die Beleuchtung so weit abgedunkelt, dass ein noch nicht übersteuertes Bild entsteht. In dieser Situation ist der Schärfentiefebereich sehr schmal, und geringe Abweichungen vom optimalen Objektivauszug haben bereits deutliche Bildunschärfen zur Folge, die man im Livebild gut erkennen kann. Auch ungeübte Bediener finden auf diese Weise schnell und intuitiv die korrekte Einstellung des Objektivauszugs. Im Idealfall wird die Blende für den Messbetrieb dann wieder zugezogen und der Prüfbereich mit höherer Intensität ausgeleuchtet. Der Schärfentiefebereich wird dann groß sein, und Schwankungen im Objektabstand werden sich wegen der optimalen Einstellung des Objektivs nur sehr geringfügig auf die Bildschärfe auswirken.

Was ist scharf?

Manchmal ist man jedoch gezwungen, die Einstellungen bei weitgehend geschlossener Blende vorzunehmen, wenn z. B. die Installation einer Hilfsbeleuchtung zu kompliziert, aus Platzgründen nicht möglich oder zu langwierig ist. Bei großem Schärfentiefebereich ist es manuell sehr schwierig, den optimalen Ob-

jektivauszug durch Beobachtung des Bildes auf einem Monitor zu finden. In solchen Fällen

ist es hilfreich, einen numerisch bewerteten Parameter aus dem Bild zu ermitteln, der als Maß für die „Bildschärfe“ dienen kann. Jeder hat a priori eine Vorstellung davon, was ein unscharfes und was ein scharfes Bild ist. Deshalb sind wir bisher in diesem Artikel auch ohne eine weitere Erläuterung oder Definition des Begriffs „Bildschärfe“ ausgekommen. Wenn Sie jedoch überlegen, was Sie eigentlich genau tun, wenn Sie ein Bild „scharf stellen“, und wie Sie merken, dass es noch unscharf ist oder bereits hinreichend scharf, werden Sie feststellen, dass Sie es nicht wirklich wissen. Da wir mit unserem körpereigenen visuellen System permanent und unwillkürlich scharfe Bilder auf unserer Netzhaut einregeln, erscheint uns dieser Vorgang als vollkommen selbstverständlich, und die Frage, nach welchem Gütekriterium wir uns dabei richten, löst manchmal interessante, gelegentlich sogar stark emotional gefärbte Reaktionen aus. Betrachten wir also ein scharfes und ein sehr unscharfes Bild einer Szene, z. B. die beiden Bilder in Abb. 1. Beim unscharfen Bild sind die in der Szene vorhandenen Strukturen kaum noch erkennbar, die Buchstaben und die Zwischenräume verschwimmen zu beinahe ununterscheidbaren Flächen. Einerseits sind die Kanten der Strukturen in der Szene sehr



stark verschliffen, also weniger steil als beim scharfen Bild. Andererseits ist der Unterschied zwischen den Grauwerten der dunklen Zeichen und der hellen Zwischenräume beim unscharfen Bild wesentlich geringer als beim scharfen Bild. Bei weiterer Defokussierung der optischen Abbildung werden die Kanten noch flacher, und die Zeichen verschmelzen mit den Zwischenräumen zu Zonen mit einheitlichem Grauwert. Aus diesen Beobachtungen ergeben sich zwei Ansätze für die Berechnung eines Güteparameters aus dem Bild, der die „Bildschärfe“ quantitativ wiedergibt.

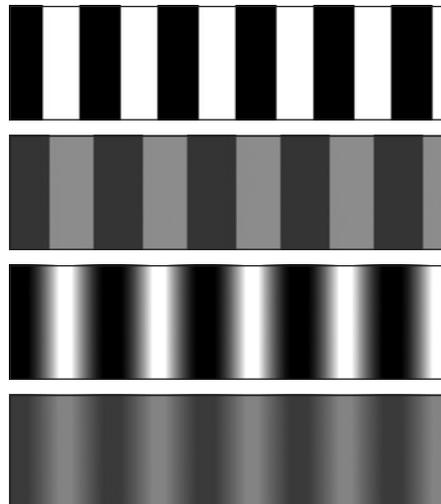
Güteparameter für die Bildschärfe

Viele Bildverarbeiter werden sofort daran denken, die Steilheit der Kanten im Bild zu bestimmen. Ein Maß dafür ist die Steigung eines Grauwertprofils durch die Kante senkrecht zur Kantenrichtung, z.B. als Differenzenquotient $(g(x+dx)-g(x-dx))/2dx$. Im einfachsten Fall bildet man für eine Kante, die parallel zur y-Achse des Bildes verläuft, lediglich $g(x+1)-g(x)$; je größer dieser Wert, desto steiler ist die Kante. Entsprechende zweidimensionale Verallgemeinerungen sind als Kantenfilter in vielfältiger Form aus der Literatur bekannt. Ihre Anwendung auf das Quellbild ergibt als Ergebnis ein neues, genauso großes Bild, in dem die Kantensteilheit für jedes Pixel als Grauwert codiert ist. Homogene Flächen erscheinen darin dunkel, unabhängig von ihrem ursprünglichen Grauwert, weil die Steigung des Grauwertverlaufs darin sehr gering ist. Lediglich im Bereich von Kanten ergeben sich hellere Zonen. Dieses Kantenbild kann man nun weiter verarbeiten. Beispielsweise kann man es mit einer empirisch ermittelten Schwelle binarisieren und einfach alle Pixel mit Grauwerten oberhalb der Schwelle zählen, also alle Pixel an Kanten mit einer Steigung größer als ein vorgegebener Wert. Nimmt man nun bei konstanter Intensität der Beleuchtung und konstanter Blendeneinstellung eine Fokussierungsserie mit verschiedenen Objektivauszügen auf, wird die Zahl der Pixel oberhalb der Binarisierungsschwelle beim optimal scharf eingestellten Bild maximal. Wenn das Verfahren jedoch unabhängig vom Bildinhalt und unabhängig von der Intensität der Beleuchtung gute Ergebnisse liefern soll, muss die optimale Schwelle für die Binarisierung des Kantenbildes dynamisch aus dem Bild berechnet werden. Die entsprechenden Ansätze sind vielen Bildverarbeitern bekannt: Sie werden bei der Segmentierung von Graustufenbildern in Vordergrund und Hintergrund mittels Binarisierung häufig

eingesetzt. Selbstverständlich sind auch komplexere Methoden als das einfache Pixelzählen zur Aufbereitung des Kantenbildes geeignet. Schon das hier skizzierte einfache Verfahren funktioniert recht gut, es ist jedoch wegen der Filteroperation mit erheblichem Rechenaufwand verbunden.

Hinweise aus dem Histogramm

Eine einfachere Methode ergibt sich aus dem zweiten oben diskutierten Gesichtspunkt. Wenn bei der Defokussierung letztlich die Grauwertdifferenzen zwischen Vordergrund und Hintergrund zumindest lokal immer geringer werden, muss sich dies in einer gleichmäßig ausgeleuchteten Szene unmittelbar im Grauwert histogramm äußern. In Abb. 1 ist zu jedem der beiden Bilder auch das zugehörige Histogramm dargestellt. In dem scharf eingestellten Bild ist die Spannweite der Grauwerte deutlich größer als im unscharfen Bild: Der kleinste Grauwert ist dort 0, der größte 223, während im unscharfen Bild nur der Bereich von 108–190 belegt ist. Der Mittelwert der Grauwerte ist in beiden Bildern übrigens annähernd gleich groß, nämlich 136,2 im scharfen Bild und 138,2 im unscharfen Bild. Beide Bilder sind also im Mittel annähernd gleich hell, sie unterscheiden sich jedoch erheblich in der Verteilung der Grauwerte. Eine beliebte und bekannte Quantifizierung einer Verteilung ist die Standardabweichung. Beim scharfen Teilbild der Abb. 1 beträgt die Standardabweichung der Grauwerte 30,7 und beim unscharfen Teilbild 5,5. Tatsächlich kann man auch mit Hilfe dieses globalen statistischen Parameters eine brauchbare ObjektivEinstellung erreichen. Allerdings ist die Verteilung beim scharf eingestellten Bild stark asymmetrisch, und ein Statistiker würde



Scharfe und unscharfe Strichraster, jeweils mit hohem und niedrigem Kontrast

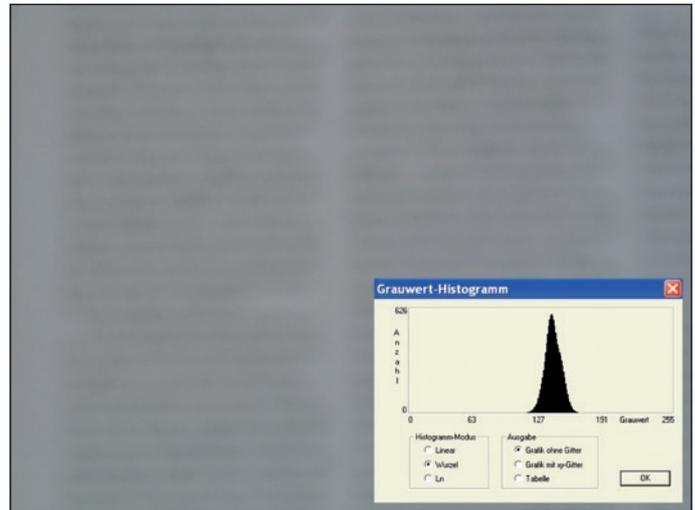
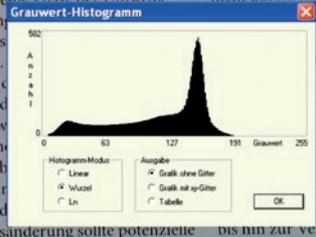
für die FHs die Gefahr, dass sie ihre bisherigen Studiengänge kürzen müssten und künftige Absolventen ausschließlich den Bachelor-Grad erhalten würden. Trotz starken Gegenwindes konnten die Fachhochschulen aber erreichen, dass sie auch den Master vergeben dürfen. Der Fachbereichstag Physikalische Technologien (FPT) vertritt seit seiner Gründung im Jahr 1994 alle Fachbereiche deutscher Hochschulen, die den Studiengang Physikalische Technik anbieten.¹¹

Die Studienreformen haben an der Universität das Physikstudium verändert [1]. An den Fachhochschulen gestalten sich die Umbrüche noch schwerwiegender. Bislang waren die Studiengänge inhaltlich aufeinander abgestimmt, sodass ein Hochschulwechsel keine Probleme bereite. Gegenüber den Vordiplomen anderer Ingenieurstudiengänge zeichnet sich die Physikalische

zwei Drittel der Absolventen im Bereich Forschung und Entwicklung arbeiten. Probleme bei der Jobsuche gab es in der Regel keine. Trotz des „guten Produkts“ Physikingenieuren die Studiendenzahlen – wie bei allen Ingenieurstudiengängen – in den 1990er-Jahren dramatisch zurück. Die Zahl der Diplomabschlüsse fiel dadurch in den Jahren 1996 bis 2001 um 44 Prozent, worauf die Fachbereiche entsprechend reagieren mussten [2]. Damit begann eine Phase der Umstrukturierung.

Diplomabschlüsse wurden. blieben Inhalte d Nur anw in den h stärker b Studierr gen Stud Namensänderung sollte potenzielle

Mitte des jetzigen reichte der Bologna Fachhochschulen. Physikalischen Tes sich lange gegen d Regelabschluss ge Reduktion der Stu zwei Semester ein Qualitätsverlust g bisherigen FH-Di. Trotzdem erwies am alten Abschlus nicht durchsetzba



Zwei Bilder derselben Szene, aufgenommen mit unterschiedlichen Objektivauszügen unter ansonsten gleichen Bedingungen. In den zugehörigen Grauwert-Histogrammen ist zur Verdeutlichung der Strukturen die Wurzel aus der absoluten Häufigkeit aufgetragen (erstellt mit AdOculus von The Imaging Source)

die Standardabweichung daher vielleicht nicht als optimale Kenngröße ansehen. Sie kann jedoch direkt aus dem Grauwert-Histogramm berechnet werden und ist somit schnell und einfach zugänglich. Noch einfacher wird die Charakterisierung der Verteilung über ihre Spannweite, also die Differenz $g_{max}-g_{min}$ zwischen dem größten und dem kleinsten auftretenden Grauwert im Bild. Im scharf eingestellten Bild aus Abb. 1 beträgt die Spannweite 223, im unscharf eingestellten Bild nur 82. Schon mit dieser sehr einfachen Kenngröße gelingt es, bei dieser Szene zu einem hinreichend scharf eingestellten Bild zu kommen. Allerdings ist dieser Ansatz nicht allgemeingültig und auch recht gefährlich. Schon ein einziger Glanzpunkt oder ein einziges schwarzes Pixel im Bild können die Spannweite drastisch erweitern, obwohl das Bild in großen Teilen unscharf ist. Ein unscharfes Bild kann außerdem auch ohne solche Artefakte eine große Spannweite haben. Stellen Sie sich z. B. ein Bild vor, dessen obere Hälfte weiß und dessen untere Hälfte schwarz ist. Bei Defokussierung der Abbildung wird zwar die Kante verschliffen, aber am oberen und am unteren Rand wird das Bild weiß bzw. schwarz bleiben. Die globale Spannweite bleibt dann unverändert, und über diesen Parameter wird es bei einem solchen Bild nicht gelingen, ein scharfes Bild zu erhalten.

Von der Spannweite ist es nur noch ein kleiner Schritt zu einem weiteren, häufig verwendeten Begriff, dem Kontrast. Eine sinnvolle Definition des Kontrasts ist $c=(g_{max}-g_{min})/(g_{max}+g_{min})$, also die Spannweite bezogen auf die Summe aus größtem und kleinstem Grauwert. Das scharf eingestellte Bild aus Abb. 1 hat den Kontrast $c=(223-0)/(223+0)=1$, das unscharf eingestellte Bild den Kontrast $c=(190-108)/(190+108)=0,275$. Auch mit

diesem Gütemaß kann man die optimale Objektiv-einstellung für die Szene aus Abb. 1 finden.

Autofokus mit Kontrast

Den Kontrast kann man auch als Modulationstiefe auffassen. Eine Struktur mit hohem Kontrast, z. B. ein Linienraster, ist sehr tief durchmoduliert, im Extremfall bis herunter zum Grauwert 0. Dann nimmt der Kontrast den Maximalwert 1 an, und zwar unabhängig von der absoluten Höhe der Modulation und unabhängig davon, ob die Kanten der Struktur steil oder weniger steil sind. Allgemein kann es unscharfe Bilder mit hohem Kontrast geben ebenso wie scharfe Bilder mit geringem Kontrast, scharfe Bilder mit hohem Kontrast und unscharfe Bilder mit geringem Kontrast. Abb. 2 zeigt dies anhand eines einfachen Beispiels. Der globale Kontrast oder auch die globale Spannweite, sogar lokaler Kontrast und lokale Spannweite, berechnet in kleinen Bildausschnitten, sind folglich nicht bei allen Szenen geeignete Gütemaße für die Optimierung der Bildscharfe. Bei einer gleichmäßig ausgeleuchteten Szene mit guter Aussteuerung der Grauwertskala, also einem mittleren Grauwert von etwa 130 und ohne Überlauf und Unterlauf, und bei genügend feinen Strukturen im Bild sind Kontrastmaße jedoch gut geeignet für die Ansteuerung einer Objektiv-einstellung mit scharfer Abbildung der Szene, wie das Beispiel in Abb. 1 demonstriert. Auf dieser Basis ist grundsätzlich auch eine automatische „Scharfeinstellung“ (Autofokus) realisierbar, sofern der Objektivauszug motorisch verändert werden kann und der gewählte Parameter bei optimaler Einstellung ein Minimum oder ein Maximum annimmt. Eine Autofokusroutine, die ein Gütemaß aus dem aktuellen Bild berechnet, liefert allerdings

im Allgemeinen nicht unmittelbar einen Zielwert für den Objektivauszug, sondern wird den optimalen Wert durch einen Regelvorgang finden müssen, der in einem Extremum des Güteparameters endet. Die Programmierung einer guten Regelung für diesen Zweck ist nicht einfach, und es müssen immer mehrere Bilder aufgenommen und ausgewertet werden, bis der optimale Zustand erreicht ist. Bei Anwendungen mit Prüfräten von mehreren Teilen pro Sekunde ist dies eine wesentliche Erschwernis. Hinzu kommt, dass das Objektiv zwischen je zwei Bildaufnahmen der Regelschleife mechanisch verfahren werden muss. Die Anforderungen an die Feinwerktechnik für ein Objektiv, das eine solche Belastung dauerhaft aushält, sind erheblich. Eine „Autofokusfunktion“ für jedes einzelne Bild wie in der digitalen Photographie wird man in der industriellen Bildverarbeitung schon aus diesen Gründen nur selten finden. Sie wird jedoch auch nicht oft benötigt, denn für viele Verfahren der industriellen Bildverarbeitung ist ein hoher Kontrast bzw. eine ausreichende Spannweite der Graustufen zwischen Vordergrund und Hintergrund und vor allem eine gleichmäßige Ausleuchtung wichtiger als ein scharfes Bild. Als Hilfsmittel bei der Einrichtung einer Prüfstation wäre ein „Scharfemonitor“ aber gewiss eine nützliche zusätzliche Funktionalität.

► Autor
Prof. Dr. Christoph Heckenkamp



Hochschule Darmstadt – University of Applied Sciences
Studiengang Optotechnik und Bildverarbeitung
heckenkamp@h-da.de
www.fbm.h-da.de