

Diplomarbeit

„Methoden zur effektiven Unterdrückung von  
Bildrauschen bei Digitalkameras“

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines  
Dipl.-Ing. (FH) für Telekommunikation und Medien  
am Fachhochschul-Diplomstudiengang Telekommunikation und Medien St. Pölten

unter der Leitung von  
**FOL Ing. Dipl.-Päd. Günter Molzar**  
**Markus Seidl**

ausgeführt von  
**Christoph H. Schöfer**  
**tm0110038103**

# Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

- ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit überein.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

## **Kurzfassung**

Bildrauschen stellt nach wie vor in der aufstrebenden Digitaltechnik der Fotografie ein gravierendes Problem dar. Speziell dunkle und schlecht ausgeleuchtete Bereiche einer Aufnahme neigen zu grobkörnigen Farb- und Helligkeitsfehlern, die hohen Ansprüchen nicht gerecht werden. Infolgedessen sind Kamerahersteller, große Softwarekonzerne und Hobbyfotografen gleichermaßen bemüht, neueste Technologien und Programme zu entwickeln, um diesem schwierigen Problem Herr zu werden.

Um einen Überblick über diesen von Konkurrenzkampf und kontinuierlicher Weiterentwicklung geprägten Markt geben zu können, fragt diese Arbeit nach den Methoden effektiver Rauschverminderung bei Digitalkameras.

Die Arbeit ist in einen theoretischen und empirischen Teil gegliedert. Zunächst wird die Bilderfassung am Chip erläutert, da Rauschstörungen hier ihren Ursprung haben. Dem folgt eine detaillierte Darlegung möglicher Ursachen von Rauschen, um die anschließend präsentierten Hard- und Softwaremöglichkeiten der Unterdrückung verstehen zu können.

Nach dem Theorieteil folgt eine empirische Untersuchung, die anhand ausgewählter kommerzieller Programme (Neat Image, Dfine, Noise Ninja, Noise Remove) die beschriebenen Vorgehensweisen demonstriert und analysiert. Eine Messung in Anlehnung an die ISO Norm 15739 gibt Aufschluss über die Effektivität der einzelnen Programme. Zudem werden Daten über Benutzerfreundlichkeit und Verarbeitungsgeschwindigkeit gesammelt.

Die gewonnenen Ergebnisse deuten zum einen darauf hin, dass keines der untersuchten Software-Programme in der Lage ist, Rauschen vollständig zu entfernen. Jedoch wurde auch deutlich, dass eine komplette Eliminierung zu Gunsten einer gewissen „Lebendigkeit“ im Bild nicht angestrebt werden sollte. Zum anderen wurde auch gezeigt, dass Rauschverminderung stets an einen Detailverlust gekoppelt ist. Schließlich zeigt noch eine Gegenüberstellung von Effizienz und Usability, dass aufwendigere Programme im Schnitt bessere Ergebnisse liefern, wohingegen einfachste One-Click-Lösungen lediglich mittelmäßige Resultate erzielen.

Schlagwörter: Bildrauschen, Rauschunterdrückung, Digitalkamera, ISO 15739, Digitalfotografie

## **Abstract**

Digital Photography suffers despite its giant progress the last few years still from some inevitable drawbacks, like image noise, which represents the topic of this paper. Especially dark and gloomy areas of a picture tend to bring coloured, bright or dark specks along which distract the human viewer from the image itself. That is why this dissertation tries to figure out methods of effective hardware and software noise repression. In addition three hypotheses about the resulting quality, sharpness and efficiency contrary usability of leading software solutions (like Neat Image, Dfine, Noise Ninja, ...) are tested.

The first, theoretical part is separated into 3 different sections. First, the image sensor is examined, which represents the origin of all the occurring image noise. The noise itself and its repression are discussed in the next two chapters. All of this is done by a review of current literature on this topic, which includes a lot of international research papers. Finally an experiment according to the ISO Norm 15739 is undertaken, which is supposed to verify the stated hypotheses from above.

The original question, what methods are feasible for tackling image noise is answered widely and on the basis of a theoretical background. It turns out that it is necessary to see the problem of noise as a whole system overlapping field and a clear separation of software and hardware approaches can't often be made anymore.

The findings of the experiment demonstrate that none of the tested programs is capable to eliminate all of the noise, which is proven not to be necessary to generate a flawless picture. Furthermore an immanent loss of detail in the process of noise reduction could be ascertained. Finally this paper states, that the more effective a programme is, the more parameter adjusting and render time is necessary.

Keywords: Image noise, Noise reduction, Digitalstillcamera, ISO 15739, Digital photography

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>7</b>
1.1. Aufbau .....	9
<b>2. Bildsensoren</b> .....	<b>10</b>
2.1. Eigenschaften von Sensoren .....	11
2.1.1. Linearität .....	11
2.1.2. Empfindlichkeit (Reaktivität, Quantum Efficiency (QE)).....	13
2.1.3. Fillfaktor .....	14
2.1.4. Dynamikumfang (Objektkontrast) .....	15
2.1.5. weitere Eigenschaften .....	15
2.2. CCD .....	17
2.3. CMOS .....	22
2.4. JFET LBCAST Sensoren.....	24
2.5. weitere Sensortypen.....	26
<b>3. Bildrauschen</b> .....	<b>28</b>
3.1. Rauscharten.....	32
3.1.1. Photonenrauschen – Photon (Shot) Noise .....	34
3.1.2. Read(out) Noise – Bias Noise – Verstärkerrauschen.....	34
3.1.3. Fixed Pattern Noise (FPN).....	36
3.1.4. Dark Current (Shot) Noise.....	37
3.1.5. Hot/Cool Pixeling – Point defect – White/Black Spot .....	38
3.1.6. thermisches Rauschen – thermal Noise .....	39
3.1.7. Reset Noise – kTC Noise.....	40
3.1.8. sonstige Rauscharten.....	41
3.2. Signal- zu Rauschverhältnis.....	41
<b>4. Gegenmaßnahmen</b> .....	<b>45</b>
4.1. Hardwarenahe Gegenmaßnahmen .....	46
4.1.1. Correlated Double Sampling (CDS).....	49
4.1.2. Black- und Darklines Subtraction.....	50
4.1.3. Dark Field Frames .....	51
4.1.4. LFPN CTIA APS .....	51
4.1.5. Active Reset for CMOS APS.....	53
4.1.6. Multiple Reads During Integration (MRDI).....	53
4.1.7. Linear Current Mode Imager .....	54
4.1.8. Pseudo Active Pixel Structure (PAPS) .....	55
4.1.9. Weitere Korrekturmethode n .....	56
4.2. Software Maßnahmen (mathematische Theorie).....	57
4.2.1. Rauscharten.....	61
4.2.2. Analysemethoden.....	63
4.2.3. digitale Filter.....	65

<b>5. Beispielprogramme</b> .....	<b>74</b>
5.1. Neat Image 5 (ABSoft) .....	74
5.2. Dfine 1.0 (nik multimedia inc.) .....	78
5.3. Noise Ninja 2.1.0 (PictureCode LLC) .....	80
5.4. Noise Remove (Stephan Stoske).....	81
5.5. Weitere Rauschunterdrückungsprogramme.....	82
<b>6. Messung</b> .....	<b>83</b>
6.1. Aufbau .....	83
6.2. Durchführung.....	85
6.3. Auswertung.....	87
6.4. Interpretation.....	91
<b>7. Reflexion und Zusammenfassung</b> .....	<b>93</b>
<b>8. Quellenverzeichnis</b> .....	<b>96</b>
<b>9. Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>99</b>
<b>Anhang A: Programmübersicht</b> .....	<b>101</b>
<b>Anhang B: Schärfebeurteilung der Testbilder</b> .....	<b>102</b>

## 1. Einleitung

Bis vor wenigen Jahren war die Digitaltechnologie bei Kameras noch eine von den Profifotografen verschmähte Nischensparte, die aufgrund der unmittelbaren Ergebnisse zwar beachtet, aber mangels Qualität eher uninteressant blieb. Mittlerweile hat die Digitaltechnologie rasante Fortschritte verzeichnet und selbst Billigstkameras können mit einer für die Ausarbeitung in Standardgrößen ausreichenden Auflösung aufwarten. So ist es wenig verwunderlich, dass kaum ein Profifotograf auf die schnelle und flexibel einsetzbare Digitaltechnik verzichten kann, die zudem bislang undenkbbare Möglichkeiten der Bildnachbearbeitung gewährt.

Durch den enormen weltweiten Absatzmarkt steigen die Produktionszahlen ebenso rasch wie die Preise sinken, und um sich unter den Konkurrenten profilieren zu können, wird meist die Anzahl der Bildpunkte als Qualitätskriterium herangezogen. Da dieses Auflösungsvermögen nur einen einzigen der vielen Qualitätsentscheidenden Faktoren bei der Wahl der idealen Kamera darstellt, müssen zusätzliche Maßstäbe zur Bewertung herangezogen werden.

Neben der Funktionalität der Automatikprogramme, der Gesamtverarbeitung der Kamera und den Objektiven betrifft das vor allem das Bildrauschverhalten, welches ein enormes Problem für jeden qualitätsbewussten Fotografen darstellt. Bildrauschen bedeutet, dass das Bild (vor allem in den dunklen Bereichen der Aufnahme) örtlich undefinierte (= unvorhersehbare) Fehler in der Helligkeit und/oder der Farbe der einzelnen Bildpunkte aufweist. Diese örtliche Unbestimmtheit und Zerstreutheit des Auftretens ist auch der Grund für das Unvermögen die Störung manuell in einer annehmbaren Zeit zu beseitigen.

So werden Mittel und Wege erforscht, die sich mit der Thematik des Rauschens beziehungsweise mit dessen Beseitigung auseinandersetzen. Die Möglichkeiten sind so vielseitig wie das Problem an sich, und reichen von direkten Hardwaremethoden in der Kamera selbst, bis hin zu Softwareprogrammen, die versuchen das Rauschen zu identifizieren und aus dem Bild heraus zu filtern.

Doch wie eindeutig diese Trennung auch klingen mag, in der Tat überschneiden sie sich in weiten Teilen. Vor allem Kamerahersteller bedienen sich Softwareroutinen und versuchen sie direkt am lichtempfindlichen Chip durch einfache Mikroprozessoren nachzubilden. Andererseits basieren die Vorgehensweisen von vielen Softwareprogrammen auf Jahre alte Grundideen der Chipfertigung.

Dieses Dickicht an Lösungswegen lässt schon die Komplexität dieses Themas erkennen und stellt so auch die Basis für die forschungsleitende Fragestellung dieser Arbeit dar, die lautet:

- **„Welche Methoden der effektiven Rauschverminderung gibt es bei Digitalkameras?“**

Um dies zufrieden stellend beantworten zu können, ist es erforderlich, zunächst die Grundlagen der Bildsensoren aufzuarbeiten. Darauf aufbauend wird das Bildrauschen an sich dargestellt, das auf verschiedenste Arten in Erscheinung tritt und durch charakteristische Merkmale beschrieben werden kann. Auf diese Erkenntnisse basierend ist es möglich, über etwaige Gegenmaßnahmen zu referieren, denn diese sind nur in Kombination mit deren Entstehung und Auswirkung zu verstehen. Diese Teile der Arbeit werden mittels einer ausführlichen Literaturrecherche erarbeitet, die sich hauptsächlich auf internationale wissenschaftliche Studien stützen. Auch Datenblätter von Chipherstellern sollten Aufschluss über Vorgehensweisen der Hardwarereduktionsmöglichkeiten bieten können.

Wie bereits dargelegt, ist Rauschverminderung unter anderem auch mit Softwareprogrammen zu realisieren. Diese finden vor allem dann Einsatz, wenn die Hardwaremöglichkeiten versagt haben oder diese überhaupt keine Anwendung fanden. Um über die Effizienz softwarebasierter Lösungen eine Aussage treffen zu können, wurden folgende Hypothesen entworfen, die mittels einer Messung in Anlehnung an die ISO Norm 15739 überprüft werden:

- **„Kein Programm kann Bildrauschen komplett aus einem Bild entfernen.“**
- **„Rauschunterdrückung ist stets mit einem Detailverlust verbunden.“**
- **„Je effektiver ein Programm gegen Rauschen vorgeht, desto aufwändiger und langwieriger ist dessen Ablauf.“**

## 1.1. Aufbau

Wie oben bereits erwähnt wurde, ist es notwendig, eine gewisse Transparenz für diese komplexe Sachlage zu schaffen indem zunächst die Grundlagen der Thematik beleuchtet werden.

Deshalb beginnt diese Arbeit im zweiten Kapitel mit der Darlegung des Aufbaus eines Bildsensors, der quasi die Ursache jedes Rauschens darstellt. Neben den gebräuchlichsten Varianten, der CCD- und CMOS-Chips, werden ebenso Neuentwicklungen und Konzepte erläutert. Allesamt haben sie gemein, das auftreffende Licht möglichst effektiv und rauschfrei in ein verwertbares Signal umzuwandeln. Auf welche Weise das aber tatsächlich geschieht soll und welche Eigenschaften einen Chip auszeichnen, wird im ersten Abschnitt erläutert.

Bereits hier werden die ersten Verweise auf das darauf folgende zweite Kapitel getroffen, das einen Überblick über die verschiedensten Rauscharten bietet. Denn nicht jedes Rauschen entsteht aus denselben Grund, unter denselben Umständen oder wirkt sich im Endeffekt gleich aus. Mit den hier erhaltenen typischen Charakteristika über das Rauschen lässt es sich in weiterer Folge identifizieren und gezielt adressieren. Der Abschnitt 3.2 dieses Kapitels widmet sich ausschließlich dem Signal- zu Rauschverhältnis, das immer dann herangezogen wird, wenn Aufschluss über die Verwertbarkeit eines vorliegenden Signals gefordert ist.

Kapitel 4 ist in zwei Unterkapitel gegliedert, die sich zunächst mit den Hardware- und anschließend mit den Softwaremöglichkeiten der Rauschminderung beschäftigen. Wobei es zu beachten gilt, dass sich Zweites zunächst lediglich um die mathematische Theorie rund um das Thema Bildrestaurierung dreht. Sämtliche Programme basieren im Wesentlichen auf diese statistikbehafteten mathematischen Grundlagen.

Erst in Kapitel 5 wird auf die eigentlichen Softwareprogramme und deren Anwendung eingegangen. Im Konkreten werden vier Lösungen (Neat Image, Dfine, Noise Ninja und Noise Remove) genauer beleuchtet, die gewählt wurden, um die grundlegenden Vorgehensweisen solcher Programme zu demonstrieren.

Abschließend wird die Messung durchgeführt, die insgesamt neun Programme auf deren Effizienz und Bedienerfreundlichkeit überprüft um so die oberhalb genannten Hypothesen überprüfen zu können. Zu guter Letzt werden die erzielten Ergebnisse noch diskutiert und zusammengefasst.

## 2. Bildsensoren

Um Rauschen und vor allem deren Entstehung verstehen zu können, ist es hilfreich sich den grundsätzlichen Aufbau eines Bildsensors etwas näher anzusehen.

Der prinzipielle Mechanismus besteht darin, Lichtquanten zunächst über eine gewisse Zeit (Belichtungszeit) in Form von elektrischer Ladung zu sammeln und in weiterer Folge in Spannung umzuwandeln. Für jeden Bildpunkt (Pixel) entsteht so eine eigene Spannung, welche unter Berücksichtigung dessen ursprünglicher Position im Abbild abgespeichert wird (=Readout Prozess). Bereits zu diesem Zeitpunkt sind zahlreiche Stationen passiert, die ein beträchtliches Rauschen verursacht haben (können). (siehe auch Abbildung 3-6)

Folgende Abbildung dient der Illustration der eben beschriebenen Prozesse. Als kleiner Vorgriff zu dem Nachfolgenden sei der prinzipielle Unterschied von CCD und CMOS im Chipdesign zu beachten.

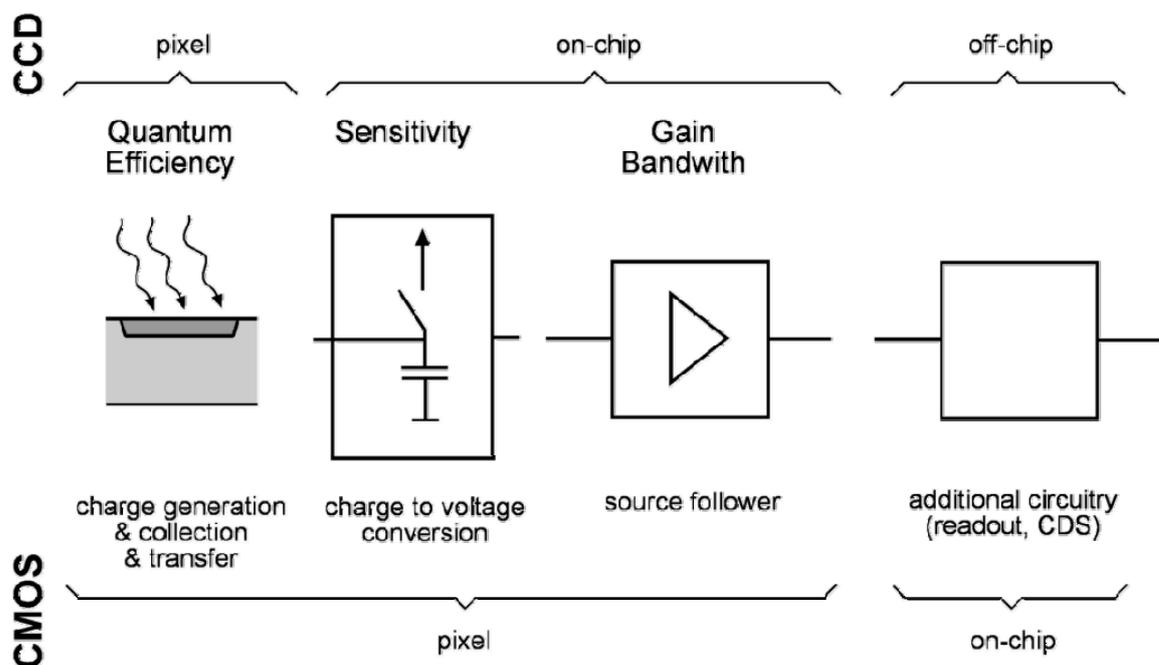


Abbildung 2-1: CCD- und CMOS- Technologie im Vergleich

Erkennbar sind sowohl die Parallelitäten im Wandlungsverfahren, als auch die Unterschiede in der Positionierung der einzelnen Elemente, die in der künftigen Rauschkussion noch eine wichtige Rolle spielen werden. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> vgl. Magnan 2003, 2

Vor dem Speichern auf den Datenchip kann, und zumeist findet auch noch ein so genanntes Postprocessing statt, bei dem zum Beispiel der Weißabgleich gegen gerechnet, Nachgeschärft und ein Kompressionsalgorithmus angewendet werden.

---

#### Exkurs RAW:

Da dieses Postprocessing vielen (vor allem Profi-) Fotografen einer Bevormundung ihrer Bildauffassung gleichkommt, gibt es oftmals die Möglichkeit die Daten als RAW abzuspeichern. Dieses proprietäre Dateiformat erlaubt es mit einem geeigneten PlugIn (zum Beispiel für Adobe Photoshop) Änderungen an der Schärfe, Farbbalance, Vignettierung und dergleichen erst nachträglich am Computer vorzunehmen. Da die Dateigrößen dabei naturgemäß erheblich zunehmen (ein Mehr an Möglichkeiten birgt auch ein Mehr an Daten) und es auch einen nicht unbeträchtlichen manuellen Aufwand bedeutet, die Bilder entsprechend abzuarbeiten (eine Stapelverarbeitung würde dem Grundgedanken der Einstellmöglichkeiten zuwider laufen), verzichten die meisten Hobbyfotografen auf diesen Luxus und überlassen diese grundlegenden Einstellungen den (zumeist) ausgezeichnet arbeitenden Automatikmodellen.<sup>2</sup>

---

Allerdings sollte man in Betracht ziehen, dass gerade das Schärfen in der Kamera (oft in 3 Stufen: leicht, mittel, stark) und die automatische ISO-Wahl (die Licht-„Empfindlichkeit“ des Chips, realisiert als konstante Offset-Verstärkung) erheblich zum Rauschmaß beitragen können. Dazu aber später noch mehr.

## **2.1. Eigenschaften von Sensoren**

Bevor näher auf die verschiedenen Chiparten und deren Eigenheiten eingegangen wird, ist es erforderlich sich generell mit den Leistungsmerkmalen, die an ein lichtempfindliches System gesetzt werden, vertraut zu machen.

### **2.1.1. Linearität**

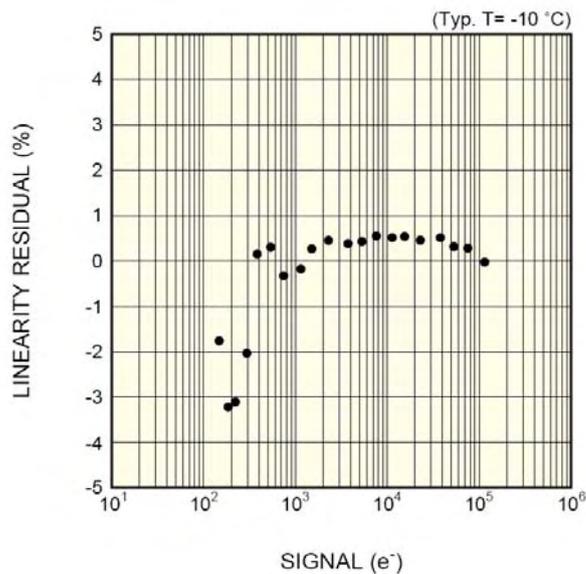
Hiermit wird der generelle Zusammenhang zwischen dem auftretenden physikalischen Signal (Licht) und dem Ausgangssignal des Elements beschrieben. Die Steigung der im xy-Diagramm aufgetragenen Kurve wird als  $\gamma$  (Gamma) bezeichnet und beträgt bei stetiger Deckungsgleichheit von Aus- und Eingang stets 1. (siehe auch Diagramm 2-3)

---

<sup>2</sup> vgl. Krautzner 2004, 257

Dies wird von modernen Chips auch beinahe erreicht, wenn auch es Gründe gibt einen anderen Faktor anzustreben (zum Beispiel 0,6 bei Vidicon Röhren, die dadurch einen komprimierten Dynamikbereich erreichen und somit für kontrastreiche Szenen geeignet sind).

In Diagramm 2-1 erkennt man den beinahe linearen Zusammenhang eines aktuellen FFT-Chips von Hamamatsu, ausgedrückt in prozentualer Abweichung von 1 (=linearity residual, was so viel bedeutet wie, was von der Linearität übrig blieb)



**Diagramm 2-1: linearer Zusammenhang zw. Aus- und Eingangssignal**

Wenn sich bei CCD-Chips der Ladungspool eines einzelnen Pixels seinem Sättigungslimit nähert, so kann dieser lineare Zusammenhang nicht mehr aufrechterhalten werden und die Kurve knickt ein. In der englischen Literatur spricht man bei diesem Sättigungspunkt auch von der „Full Well Capacity“ oder einem „Linear Full Well“, weil ab hier die gesammelte Ladung nicht mehr wahrheitsgetreu in Bildinformationen umgewandelt werden kann. Im Bild macht sich ein unter dem Namen „Blooming“ bekannter Fehler bemerkbar<sup>3</sup> (siehe auch Exkurs: Blooming)

<sup>3</sup> vgl. Göhring 2002, 23

### 2.1.2. Empfindlichkeit (Reaktivität, Quantum Efficiency, QE)

Man unterscheidet grundlegend zwischen absoluter und relativer Empfindlichkeit. Während das Erstere die Mindestanzahl an Photoelektronen beschreibt, die notwendig sind damit das lichtempfindliche System überhaupt reagiert, gibt Zweiteres Auskunft über die Anzahl der Elektronen die in der Ausgangsstufe einen digitalen Sprung auf die nächste Helligkeitsstufe erwirken (= ein Wechsel des minderwertigsten Bits, LSB)

Da moderne Chips durchaus in der Lage sind, Lichtphotonen einzeln umzusetzen, ist der bestimmende Faktor in punkto absolute Empfindlichkeit, das Rauschverhalten des Chips, das sich wie ein Teppich über das Spektrum legt. Natürlich steht diese Empfindlichkeit im direkten Zusammenhang mit der tatsächlichen Pixelgröße, die genutzt werden kann um Photonen überhaupt aufzunehmen.

Die relative Sensitivität liegt bei Hochleistungschips bei erstaunlichen 8 Photoelektronen (ca. 16 Photonen), die schon ausreichen um 2 Graustufen voneinander zu trennen.

Zusätzlich zu den beiden bereits erwähnten existiert noch eine spektrale Empfindlichkeit, mit der man die veränderliche Empfindlichkeit eines Sensors über die Wellenlänge hinweg angibt. Denn ähnlich dem menschlichen Auge ist auch kein lichtempfindlicher Chip in der Lage alle Bereiche des Spektrums (von Ultraviolett bis Infrarot) gleichermaßen abzudecken.<sup>4</sup>

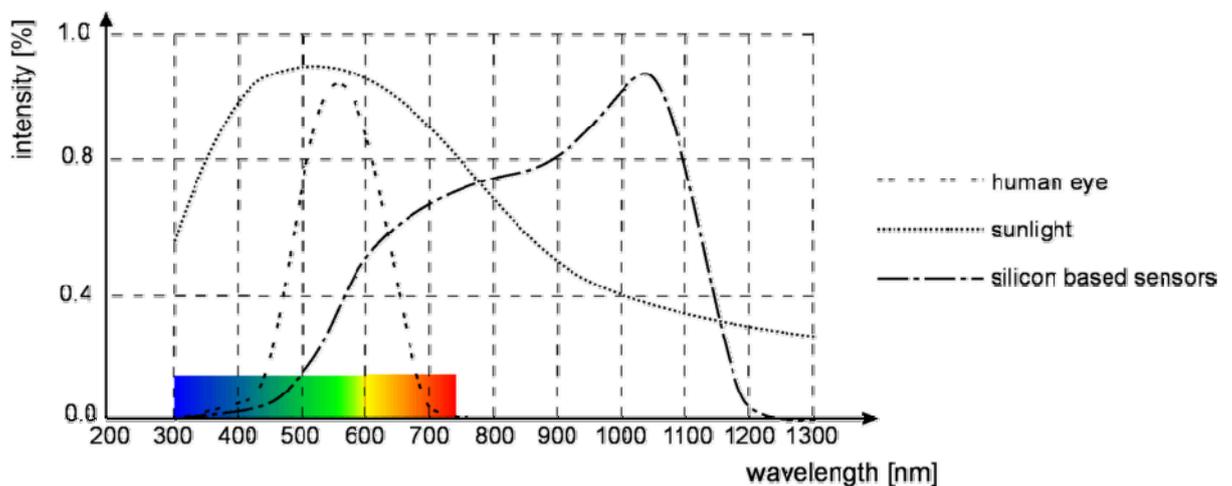


Diagramm 2-2: typische spektrale Empfindlichkeiten

Wie in Diagramm 2-2 zu sehen ist, besteht nur eine bedingte Übereinstimmung zwischen der Empfindlichkeit des menschlichen Auges und der von Sensoren. Gerade im

<sup>4</sup> vgl. Young, Gerbrands, van Vliet 1998, 36 & 42

kurzwelligem blauen Bereich zeigt ein typischer CCD-Sensor (hervorgerufen durch sein Polysilizium-Fenster, das ihn schützt) schlechte Ergebnisse. Deshalb hat zum Beispiel Kodak eine Technologie namens ITO (Indium Tin Oxide) entworfen, die die Empfindlichkeit im Blau-Kanal um eine ganze Blendenstufe steigert.<sup>5</sup>

Trotz dieser Verbesserung des Blau-Kanals muss dieser Bereich nach wie vor großzügig verstärkt werden, was aufgrund des Verstärkerrauschens (siehe Kapitel 3.1.2) in einem erhöhten Störungsauftreten endet. Deshalb wird bei den Rauschunterdrückungsalgorithmen oft der Blau-Kanal gesondert behandelt.

### 2.1.3. Fillfaktor

Der so genannte Fillfaktor gibt das Verhältnis von der lichtempfindlichen zur gesamten Chipoberfläche an. Denn all zu oft muss ein gewisser Teil für die Unterstützungslogik (Transistoren und dergleichen) „geopfert“ werden. Diese Apertur ist u. a. ein wichtiges Maß für den erreichbaren Signal-Rauschabstand. Abhilfe schafft hier eine Änderung der Struktur, wie zum Beispiel das Ausleseregister zu verlagern oder die mittlerweile überall eingesetzten Mikrolinsen. Diese teilweise bis zu 10  $\mu\text{m}$  kleinen Linsen höchster Güte liegen über jedem lichtempfindlichen Bereich und beugen so das Licht in Richtung des Sensorelements. Problematisch ist der Einsatz vor allem bei Kameras mit hoher Pixelanzahl und kleiner Chipfläche, denn erstens müssen die Linsen immer kleiner werden (man stößt an die Fertigungsgrenzen) und zweitens kann es vorkommen, dass Licht gebündelt wird, das an sich eigentlich nicht im Gebiet des fraglichen Pixels aufgetroffen wäre.<sup>6</sup>

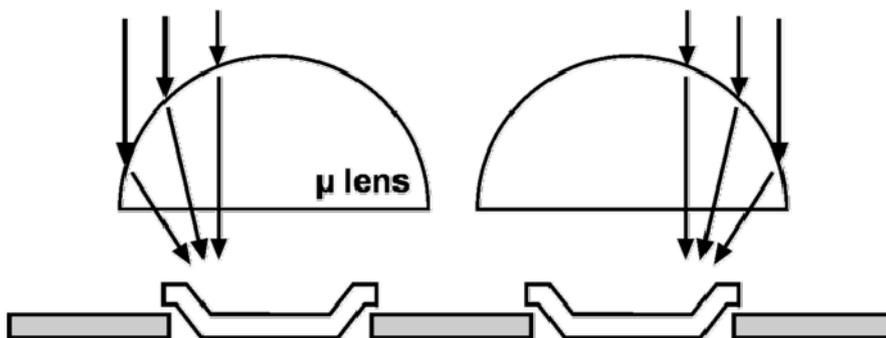


Abbildung 2-2: Mikrolinsen beugen das Licht um den Fill-Faktor zu erhöhen<sup>7</sup>

<sup>5</sup> vgl. Krautzner 2004, 175

<sup>6</sup> vgl. Göhring 2002, 25

<sup>7</sup> vgl. [http://sternwarte-moembris.de/CCD%20Kamera/body\\_body\\_platinum\\_x1.htm](http://sternwarte-moembris.de/CCD%20Kamera/body_body_platinum_x1.htm) (03. 06. 2005)

### 2.1.4. Dynamikumfang (Objektkontrast)

Der Dynamikumfang gibt das maximale Verhältnis von der hellsten (Sättigung) bis zum dunkelsten, gerade noch wahrnehmbaren (wenn das Rauschen ein Drittel des Nutzsignals beträgt) Bereich an.<sup>8</sup>

Wie so viele andere Eigenschaften ist auch diese von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Belichtungszeit abhängig (resultierend aus dem unterschiedlichen Dunkelrauschen).

Bei modernen Chips beträgt er über 90 dB, welcher aber aufgrund Einflüsse des Gesamtaufbaus auf ca. 70 dB reduziert wird.

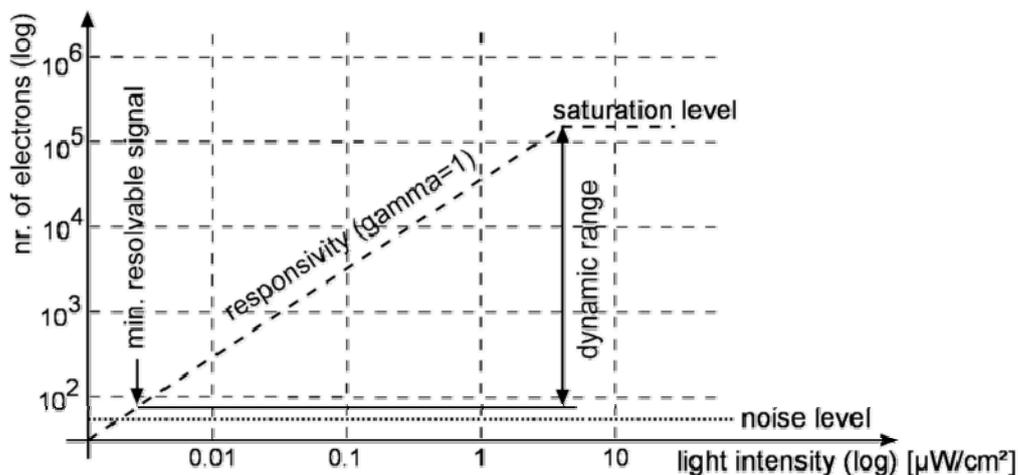


Diagramm 2-3: der Dynamikbereich wird durch das Rauschen und die Sättigung beschränkt

### 2.1.5. weitere Eigenschaften

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Eigenschaften, existieren noch eine Vielzahl weiterer, die aber aufgrund einer fixierten Betrachtung zum Thema Bildrauschen nur der Vollständigkeit halber hier erwähnt werden:

- **Shading** – abweichende Abbildung der Realität über das Bild hinweg, hervorgerufen durch ungleichmäßige Empfindlichkeit oder Beleuchtung.
- **Pixelform** – meist quadratisch, aber im Videosektor auch davon abweichend. Super CCD ist eine Weiterentwicklung von Fuji, die Pixel sechseckig wabenförmig anordnet und so eine Erhöhung der Pixel pro Fläche ermöglichen soll. Hat sich aber nicht durchgesetzt, weil die durch Interpolation errechnete Pixelzahl nicht mit der tatsächlichen Auflösung vergleichbar ist.

<sup>8</sup> vgl. ColorFoto 2005, 46

- **Charge Transfer Efficiency (CTE)** – das Vermögen, die auftretende Ladung zum Verstärker zu transportieren (nur bei CCD)
- **Bildumfang** – gibt Aufschluss über die Tatsache, inwieweit die zum Beispiel 8 Bit pro Farbe (=256 Helligkeitsstufen) wirklich umgesetzt wurden. Oftmals werden die oberen und unteren Bereiche aufgrund von abweichenden Linearitäten des Sensors abgeschnitten. Wie zum Beispiel beim Dark Current, ein Stromfluss, der auch bei abgedunkelter Blende auf einem CCD entsteht. Um ihn auszugleichen wird, er gemessen und vom Ergebnis abgezogen, somit fehlt immer ein Teil des möglichen unteren Wertebereichs und der Bildumfang ist beschnitten.
- Nicht zu vergessen sei das **Signal zu Rauschverhältnis** (SNR – Signal to Noise Ratio), welches logarithmisch ausgedrückt in Dezibel Auskunft über den Abstand gibt, den das Nutzsignal vom Rauschen einnimmt. Erst ab einer gewissen Differenzierung kann man von einem für das menschliche Auge ansprechendem Bild sprechen. Wie sich später zeigt, lässt sich rein theoretisch beinahe jedes Rauschen eliminieren, lediglich das Photonen Rauschen wird stets übrig bleiben und somit das SNR ewig einen endlichen Wert annehmen. Da eben nicht das Rauschen selbst, sondern das Verhältnis von Nutz- zu Rauschsignal entscheidend über die Qualität eines Bildes ist, spielt die Chipgröße, beziehungsweise in weiterer Folge die einzelne Pixelgröße eine entscheidende Rolle. Denn während sich das Gesamtaufkommen des Rauschens nicht verändert, sinkt das Nutzsignal aufgrund der kleineren lichtempfindlichen Oberfläche, das sich letztendlich in einem schlechteren (=kleineren) SNR widerspiegelt.<sup>9</sup> (siehe Kapitel 3.2)

---

<sup>9</sup> vgl. ebd., 46

## 2.2. CCD

CCD-Chips (Charged Coupled Device = ladungsgekoppeltes Element) sind die meist verbreiteten Sensorelemente im Bereich von Videokameras, Scannern oder eben digitalen Fotoapparaten. Doch der ursprüngliche Verwendungszweck, als sie von Forschern der Bell Laboratories in den 60er Jahren entwickelt wurden, war ein Speicherbaustein, als welche sie auch Jahrzehnte lang im Einsatz waren. Bis man später das Vermögen des Ladungstransports in Verbindung mit der Lichtempfindlichkeit als potentielles Bilderfassungselement erkannte. Da die Speichertechnologie mittlerweile völlig andere Wege geht, ist der CCD-Chip fast ausschließlich nur mehr als Allzweck-Bildsensor im Einsatz.<sup>10</sup>

### Exkurs: Anfänge der Digitalkamera

1981 schaffte es ein auf dem Sektor der Fotografie eigentlich krasser Außenseiter namens Sony zur Photokina in Köln die erste Kamera der Welt vorzustellen, die mittels eines CCD-Chips Standbilder in einer Auflösung von 570 x 490 Pixel auf Disketten abzuspeichern vermochte. Aufgrund der magnetischen Aufzeichnung des Bildes auf Diskette wurde sie kurzerhand MAVICA für Magnetic Video Camera getauft. Doch trotz des CCD-Sensors konnte man noch nicht von einer Digitalkamera sprechen, denn die



Bildinformation wurde nicht in digitaler Form, sondern als analoges Signal abgespeichert. Wollte man das Bild auf einem Computer weiterverarbeiten, war es immer noch notwendig, die Daten mit einer AD-Wandlerkarte zu digitalisieren. Dennoch war der Weg für die Digitalkamera geebnet.<sup>12</sup>

Abbildung 2-3: die Sony MAVICA<sup>11</sup>

<sup>10</sup> vgl. Göhring 2002, 10

<sup>11</sup> [http://www.digicamhistory.com/1980\\_1983.html](http://www.digicamhistory.com/1980_1983.html) (03. 06. 2005)

<sup>12</sup> vgl. ebd.

Ein CCD-Chip wird hergestellt, indem auf einem Wafer (Silizium Scheibe) durch mehrere komplexe lithografische Schritte das Silizium-Substrat dotiert wird und somit zahlreiche elektrisch positive Elektronenlöcher entstehen. Trifft nun Licht in Form von sichtbaren oder infraroten Quanten auf ein Siliziumatom, so „springen Elektronen aufgrund einer Reaktion zwischen den Photonen und den Valenzelektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband.“ (Göhring, 2002, S. 4) Neben diversen anderen Faktoren (Wellenlänge, ...) bestimmt hauptsächlich die Lichtstärke die entstehende Ladungsmenge, die infolge in einem Ladungspool gesammelt wird. Aus der Größe dieser Pools resultiert letztlich auch die (mittlerweile erstaunliche) Dynamik digital erzeugter Bilder. Jedes so geschaffene Ladungspaket wird in Form von Schieberegistern (vgl. ursprüngliches Einsatzgebiet von CCD-Chips) zu einem Verstärker transportiert.<sup>13</sup> (siehe Abbildung 2-4)

Der praktische Nutzen am Ladungstransport (im Gegensatz zu Strom oder Spannung) liegt an der hohen erreichbaren Empfindlichkeit. Denn ergibt sich die Spannung  $U$  aus der Division der Ladung  $Q$  durch eine Kapazität, so „reicht“ es den Kondensator klein genug zu machen um eine hohe resultierende Spannung zu erzielen.

$$\begin{aligned}
 U &= \text{Spannung [V]} \\
 U &= \frac{Q}{C} & C &= \text{Kapazität [F]} & (1) \\
 Q &= \text{Ladung [C]}
 \end{aligned}$$

Moderne CCDs haben eine Kapazität in der Größenordnung von 16fF ( $16 \cdot 10^{-15}\text{F}$ ), welche im Sättigungsbereich von  $10^6$  Elektronen (ein Elektron hat eine Ladung von ca.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Coloumb) eine Ausgangsspannung von 10V ergeben. Dies ist ein erstaunlich hoher Wert, der die Basis für ein hohes SNR bildet.

Wie in Abbildung 2-4 ersichtlich, besitzen CCDs oft nur einen einzigen Ausgangsverstärker für alle Pixel. Dies hat den großen Vorteil, dass herstellungsbedingte Schwankungen des Verstärkungsfaktors, wie es bei CMOS der Fall ist, gar nicht erst auftreten können. Da bei den heutigen geforderten Auslesegeschwindigkeiten dies ein einziges Verstärkungselement nicht mehr bewerkstelligen kann, wird der Chip in Unterelemente aufgeteilt und somit ein Kompromiss erzielt.<sup>14</sup>

<sup>13</sup> vgl. Göhring 2002, 14

<sup>14</sup> vgl. Hornsey 1999b, 17

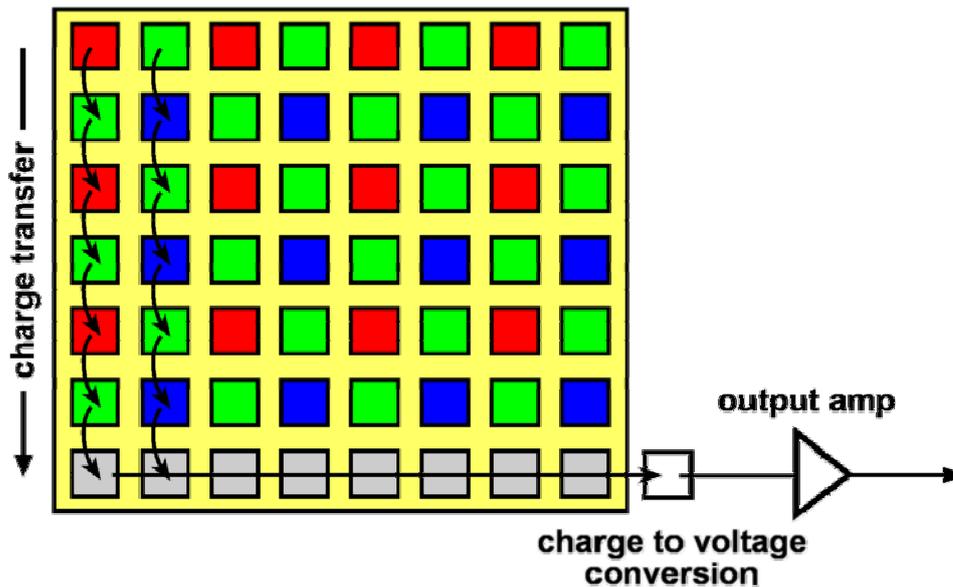


Abbildung 2-4: der Ladungstransport erfolgt zunächst parallel, dann seriell<sup>15</sup>

An der obigen Skizze erkennt man auch, dass nicht jede Fotozelle jede Farbe aufnimmt, sondern immer 4 benachbarte ein Quadrupel ergeben. Wobei der Grünanteil, um der erhöhten Empfindlichkeit des menschlichen Auges zu entsprechen, doppelt so hoch ist (Bayer-Mosaik). Aus den 3 Grundfarben und durch eine komplexe Farbinterpolation lässt sich dann ein komplett farbiges Bild errechnen (ähnlich dem menschlichen Auge). Da dies immer ein fehlerbehafteter Vorgang ist, bedient man sich im Profisektor drei Farbfiltern, die das so getrennte Licht auf drei einzelne Sensoren lenken und somit eine wesentlich größere Chipfläche zur Verfügung steht.

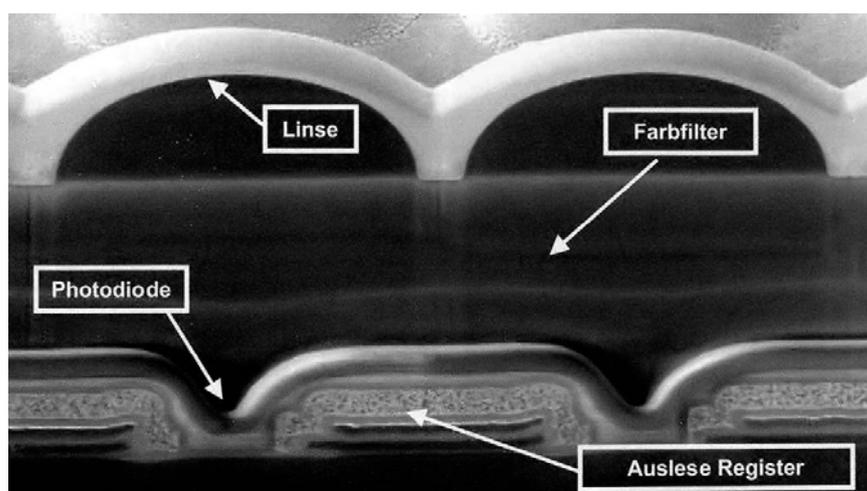


Abbildung 2-5: der Querschnitt eines CCD - Chips<sup>16</sup>

<sup>15</sup> Göhring 2002, 14

<sup>16</sup> Krautzner 2004, 171

Am Querschnitt des Chips in Abbildung 2-5 erkennt man die über dem Farbfilter angesiedelten Mikrolinsen, welche die Lichtausbeute weiter erhöhen soll. Denn bei den bisher besprochenen Interline Transfer CCDs beträgt der so genannte Fill-Faktor oder Apertur (lichtempfindliche Oberflächenanteil) lediglich ca. 30%. Der Rest der Fläche entfällt auf die Unterstützungslogik (Transistoren), die zwar notwendig ist, aber nicht zum Sammeln von Lichtquanten beiträgt und somit den erreichbaren Signal-Rauschabstand schmälert.<sup>17</sup>

Ein Schritt in diese Richtung schaffen hier Full Frame CCD-Chips, die momentan das höchste Maß an Qualität bieten. Durch einen veränderten Aufbau erreichen sie einen Fill-Faktor von bis zu 70%, womit mehr Pixel auf dem Chip untergebracht werden können, was wiederum in einer erhöhten Auflösung resultiert. Des Weiteren erreichen sie einen Dynamikumfang von bis zu 12 Blenden (entspricht ca. 72 dB), dass die 7 bis 8 Blenden des alten Analog-Negativs bei weitem übersteigt. Im Gegenzug zu den ausgeprägten Ausleseregistern beim Interline-Sensor finden die Elektronen viel langsamer ihren Weg über den Chip und so ist ein mechanischer Verschluss erforderlich, der das auftreffende Licht abschattet, da es ansonsten zu Schlierenbildung kommen kann.<sup>18</sup>

Eine andere Möglichkeit, die aber aufgrund der teuren und komplexen Fertigung (die von nur wenigen Herstellern beherrscht wird) nur bei Profikameras Einsatz findet, ist es, den Chip so dünn zu fabrizieren, dass er von der Unterseite bestrahlt werden kann und sich so das Ausleseregister nicht mehr im Lichtweg befindet. Solche CCD-Chips werden als „back-illuminated“ bezeichnet.<sup>19</sup>

---

### Exkurs: Blooming

Diese ausschließlich bei CCD-Chips auftretende Störung des Bildes rührt von der beschränkten Größe der Ladungspools, die jedem Pixel zur Verfügung stehen. Wird der Chip einer extrem großen Menge an Licht ausgesetzt (z. B. bei einer Aufnahme gegen die Sonne), so verliert der betroffene Pixel nicht nur seinen linearen Zusammenhang von Aus- und Eingangssignal, sondern es gelangen auch überschüssige Ladungsträger in die benachbarten Pools. Das resultiert in einem Überstrahlen und in einer Farbverschiebung in den Magentabereich weit rund um den betroffenen Bereich hinaus.

---

<sup>17</sup> vgl. Göhring 2002, 17

<sup>18</sup> vgl. Krautzner 2004, 185

<sup>19</sup> vgl. Medkeff 2004, 2



**Abbildung 2-6: Blooming Effekt bei intensiven Gegenlicht-Aufnahmen<sup>20</sup>**

Abhilfe schaffen hier spezielle Techniken auf dem Chip, die es ermöglichen überschüssige Ladungen (wenn 100%ige Sättigung erreicht ist) einfach abzuführen. Durch so genannte Drains wird die Ladung aus dem Pool abgeleitet, bevor sie auf die benachbarten Bereiche „überschwappen“ kann. Dies hat wiederum den Nachteil, dass durch die Zusatzschaltung wichtige lichtempfindliche Oberfläche verloren geht, die den Fill-Faktor entscheidend verringert. Deshalb ist man dazu übergegangen, ein vertikales Antiblooming einzubauen (Lateral Overflow Drain) der die Fläche nicht tangiert (zum Beispiel realisiert von Kodak bei der Neun-Micron Pixelarchitektur). Ebenso wie bei diesem Verfahren ist auch das Clocked Antiblooming aufwendig zu realisieren, bei dem ständig gezielte Elektronenlöcher erzeugt werden, die die überschüssige Ladung abfangen.<sup>21</sup>

Da CMOS Chips, wie im nächsten Kapitel ersichtlich wird (und Abbildung 2-1 auch bereits gezeigt hat), die Ladung bereits im Pixel in Spannung umwandelt, kann es nicht (in diesem Ausmaß) zu einem Überstrahlen der Signale kommen und deshalb ist Blooming ein exklusives CCD-Problem.

---

<sup>20</sup> <http://www.ccd-sensor.de/html/blooming.html> (03. 06. 2005)

<sup>21</sup> vgl. ebd.

### 2.3. CMOS

Die CMOS-Technologie (Complementary Metal Oxide Semiconductor) entstand bereits in den 70er Jahren. Doch aufgrund der komplexen Schaltkreise auf der Chipebene und deren unbefriedigend effizienten Herstellungsweisen war diese Technologie bis in die 90er Jahre relativ bedeutungslos. Erst in der letzten Zeit wird die Technik dank der kostengünstigen Herstellungsmöglichkeiten (welche sehr ähnlich zu den für RAM-Bausteinen sind) und deren geringen Stromverbrauch zunehmend interessanter.<sup>22</sup>

Mittlerweile hat die Halbleiter-Industrie die Technik so weit im Griff um einsatztaugliche Bildsensoren zu erzeugen. Im Gegensatz zur CCD-Technologie, bei der quasi „nur“ das Sammeln der Photonen (neben den Schieberegistern) auf dem Chip untergebracht ist, ist es auf dem CMOS-Sektor möglich, zusätzliche Funktionen wie Timing, Analog zu Digital Wandlung (ADC), Bildkontrolle, Taktung, Weißabgleich und dergleichen auf dem Chip zu implementieren. Diese zahlreichen Zusatzfunktionen erfordern auch ihren Tribut an der lichtempfindlichen Größe, weshalb die bereits beschriebenen Mikrolinsen noch zwingender erforderlich sind.

Mit Hilfe einer ausgeklügelten Technologie namens „Active Pixel Sensors“ (APS) ist es unter anderem möglich, jeden Pixel einzeln zu adressieren und auszulesen. Dadurch ist man in der Lage z. B. Chipfehler pixelweise zu korrigieren. Gerade das Fixed Pattern Noise (FPN) lässt sich mit Hilfe von zusätzlicher Schaltungslogik ausgezeichnet kompensieren.

Zusätzlich ermöglicht die direkte Adressierung der einzelnen Pixel auch das so genannte Windowing, das benötigt wird, wenn man nur Teile der aktiven Fläche eines Chips auslesen möchte. Vor allem im Videosektor ist dies durchaus nützlich, denn die reduzierte Aufnahmefläche erlaubt so höhere Frameraten. Verschiedenste Bildstabilisatoren arbeiten ebenso nach dem Prinzip. Kann etwa eine kleine ruckartige Bewegung in eine Richtung festgestellt werden, so ist es durch Windowing möglich, das Sichtfenster um die entsprechende Wegstrecke in die entgegen gesetzte Richtung zu verschieben, um das finale Bild unbewegt erscheinen zu lassen.<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> vgl. Krautzner 2004, 185

<sup>23</sup> vgl. Göhring 2002, 15f

Zusätzlich erspart man sich durch die direkte Adressierung und Auslesemöglichkeit, die langen Ladungstransfers, die bei CCD aufgrund der nie 100%igen CTE ein nicht unwesentliches Problem darstellen.<sup>25</sup>

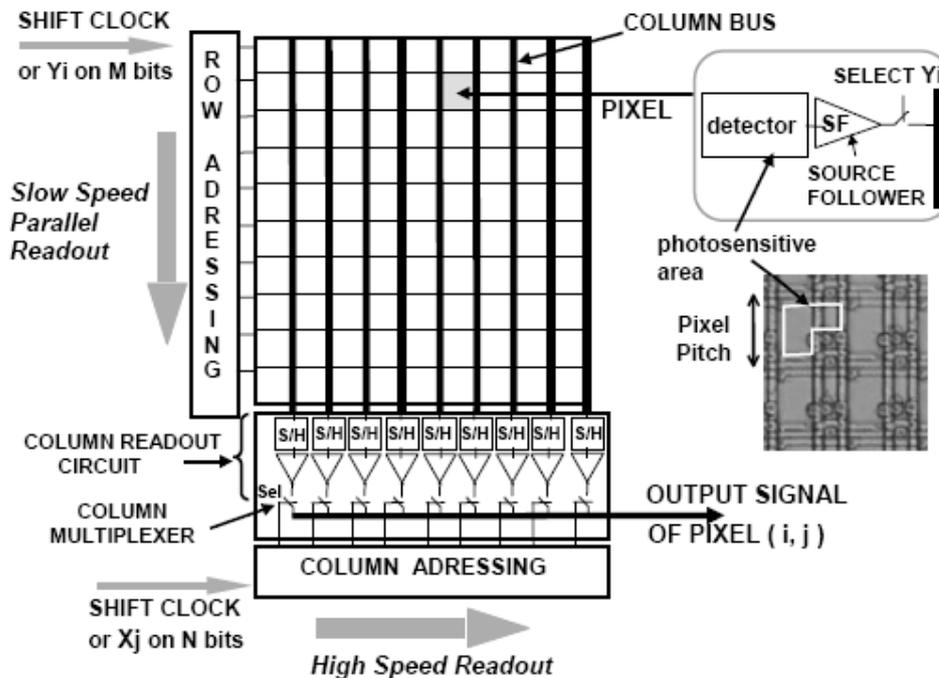


Abbildung 2-7: CMOS APS-Architektur<sup>24</sup>

CMOS-Sensoren haben dank der beschriebenen geringen Herstellungskosten und ebensolchen Stromverbrauchs, Unempfindlichkeit gegenüber Überstrahlen (siehe Exkurs Blooming) und der erwähnten Adressiermöglichkeiten APS, gewaltig gegenüber ihren CCD-Alternativen an Boden gut gemacht. Denn selbst alt eingebrachte Kritikpunkte wie hohes Rauschverhalten und mangelhafte Farbtreue haben die Entwickler erstaunlich gut in den Griff bekommen. Hier ist definitiv in den nächsten Jahren am meisten Entwicklungspotential vorhanden.

Waren den CMOS Chips bis vor 2 Jahren lt. Göhring (2002) noch qualitätsunkritische Anwendungen wie Überwachungskameras, Webcams, Spielsachen und dergleichen vorbehalten, so stößt man mittlerweile durchaus in den professionellen Sektor vor.

Einer der Gründe dafür ist, dass wichtiger als die in den Medien gepushten Megapixel-Anzahl (Auflösungsvermögen der DSC) die tatsächliche Größe des Chips ist, die hier dank der geringen Herstellungskosten gegenüber CCD klare Vorteile besitzt. Während man bei

<sup>24</sup> Mangan 2003, 201

<sup>25</sup> vgl. ebd., 202

Zweiterem noch die Chipgröße gegenüber Kleinbild verringern muss (wodurch auch die Verlängerungsfaktoren bei den Objektiven entstehen), kann man bei CMOS bereits die Full-Size KB Größe auch für den semi-professionellen Bereich realisieren. Hiermit lassen sich auflösungs- und schärfetechnisch sensationelle Ergebnisse erzielen. Leider vorwiegend im Studio, da der reduzierte Dynamikbereich ein ausgewogenes Licht erfordert, das man in „freier Wildbahn“ nur selten vorfindet. Doch wie bereits erwähnt, ist die Industrie auch hier auf dem besten Wege die CCD-Ergebnisse zu erreichen beziehungsweise zu übertreffen.<sup>26</sup>

Eine äußerst interessante Weiterentwicklung des APS wurde erst kürzlich von Mitgliedern des IEEE vorgestellt und kombiniert die Vorteile der Passiven- (PPS) und der Aktiven Pixel Struktur (APS). Mehr über diese Pseudo Active Pixel Structure (PAPS) genannte Technik in Kapitel 4.1.8.

## 2.4. JFET LBCAST Sensoren

Im Sommer 2003 gesellte sich zu den beiden den Markt dominierenden Sensortypen noch ein dritter aus den hauseigenen Entwicklungsstudios von Nikon dazu. Nach 10-jähriger Grundlagenforschung verkündete man vollmundig eine Technologie basierend auf der JFET-Halbleiterarchitektur entwickelt zu haben, die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, geringen Stromverbrauch und ein ebensolches Rauschmaß garantieren soll.

JFET-Sensoren (Junction Field Effect Transistor = Sperrschicht Transistoren) arbeiten im Prinzip sehr ähnlich zu CMOS-Sensoren. Sie reagieren ebenso auf ein statisches Spannungsfeld und kommen so im Gegensatz zu den CCD-Pendants, bei denen ein ständiger Stromfluss von Nöten ist (Energieprinzip), mit wenig Energie aus. Zusätzlich werden bei dieser Neuentwicklung lediglich 3 Transistoren pro Pixel benötigt (anstatt der 4 bei CMOS), wodurch sich so bei einer durchschnittlichen Kamera über 4 Millionen Transistoren einsparen lassen. Dies macht sich in Folge in einem geringern Strombedarf und schaltungsbedingten Rauschen bemerkbar.

Das Lateral des Begriffs „Lateral Buried Charge Accumulator and Sensing Transistor Array“ (oder kurz LBCAST) „verweist darauf, dass der Elektronenfluss hauptsächlich horizontal und nicht vertikal verläuft. Dies ermöglicht sehr kurze Wege zwischen der optischen Oberfläche des Sensors [...] und der Ausgabeseite.“<sup>27</sup> Es ist einsichtig, dass

---

<sup>26</sup> vgl. Krautzner 2004, 185ff

<sup>27</sup> [www.asbyon.de/screen/wissen/technik/010/010\\_tech\\_06.asp](http://www.asbyon.de/screen/wissen/technik/010/010_tech_06.asp) (03. 06. 2005)

dadurch eine Verbesserung der Sensorempfindlichkeit und der Geschwindigkeit erzielt werden kann. Während beim CMOS-Sensor die stets notwendige Verstärkung des Signals immer zeilen- oder spaltenweise erfolgen muss, vermag ein JFET-Sensor jedes Pixel für sich zu verstärken. Dadurch steht jedem Verstärker prinzipiell mehr Zeit zur Verfügung, das wiederum in einem geringeren Rauschmaß resultiert.<sup>28</sup>

Was sich in der Theorie viel versprechend anhört, hat sich leider nur zum Teil bewahrheitet. Zwar erzielt man tatsächlich erstaunliche Auslösegeschwindigkeiten und auch der Stromverbrauch ist bescheiden, jedoch just das Rauschverhalten konnte die Erwartungen nicht erfüllen. Speziell unterbelichtete Szenen scheinen sehr heikel zu reagieren, dafür hat man immerhin das „hot pixeling“ bei Langzeitaufnahmen beinahe abgeschafft.

Über Gründe für diese Erscheinungen hüllt man sich bei Nikon in Schweigen und verweist auf den Prototypenstatus dieser neuartigen Technologie. Man kann gespannt sein, welche Erweiterungen die Experten in Zukunft präsentieren werden, um mit den Platzhirschen Canon und Kodak weiterhin mithalten zu können.<sup>29</sup>



**Abbildung 2-8: Der JFET LBCAST-Sensor von Nikon<sup>30</sup>**

<sup>28</sup> vgl. ebd.

<sup>29</sup> Hogan 2004, Nikon D2H Review

<sup>30</sup> [www.asbyon.de/screen/wissen/technik/010/010\\_tech\\_06.asp](http://www.asbyon.de/screen/wissen/technik/010/010_tech_06.asp) (03. 06. 2005)

## 2.5. weitere Sensortypen

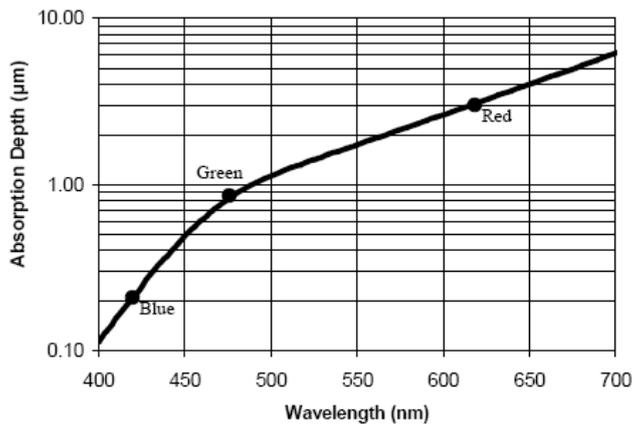
Der Vollständigkeit halber sollen noch drei weitere Sensortypen Erwähnung finden:

- **CID** – steht für Charge Injection Devices und stellt eine weitere Technologie der Lichtumwandlung in DSCs dar. Es wird die Eigenheit der Adressierbarkeit der Pixel von CMOS und des Ladungstransportprinzips von CCD kombiniert. Gerade im Zusammenhang mit der Untersuchung des Rauschverhaltens macht sich eine Eigenschaft besonders bemerkbar: Es ist ein nicht-destruktiver Auslesevorgang durchführbar, der es im Gegensatz zu den bisher besprochenen Methoden möglich macht, ein und dasselbe Bild mehrmals aus den Registern auszulesen. Durch eine Durchschnittsbildung der Bilder lässt sich somit das Rauschen um den Faktor  $1/\sqrt{N}$  ( $N$  = Anzahl der Bilder) reduzieren. Natürlich gilt es die zeitliche Limitierung des Einlesevorgangs zu berücksichtigen. Der Haken an der an sich klugen Idee ist, dass ein aufwändiges Bussystem die Umwandlungsgenauigkeit dermaßen einschränkt, dass wieder ein hohes Rauschmaß entsteht und der Effekt verschwindend klein wird.<sup>31</sup>
- **CMD** – basieren wie die CMOS-Sensoren auf MOSFET-Technologie, wobei die Barriere, die die Elektronen überwinden müssen um von der Source zur Drain zu gelangen, durch Lichteinfluss verringert wird. Somit entsteht wieder wie bei allen anderen Systemen ein Zusammenhang zwischen Lichteinfall und Elektronenfluss, der wieder in digitale Information umgewandelt werden kann.<sup>32</sup>
- **Foveon X3** - Im Jahr 2002 hat Sigma gemeinsam mit Foveon den X3-Chip entwickelt, der ähnlich zu analogen Filmmaterial das Licht in verschiedene Eindringtiefen durchlässt und somit mit einem einzigen Pixel alle drei Farben zugleich wahrnehmen kann. Aufgrund der stapelartigen Anordnung der Schichten spricht man auch von einem „Stacked Photodiode Sensor“.

---

<sup>31</sup> vgl. Hornsey 1999b, 2f

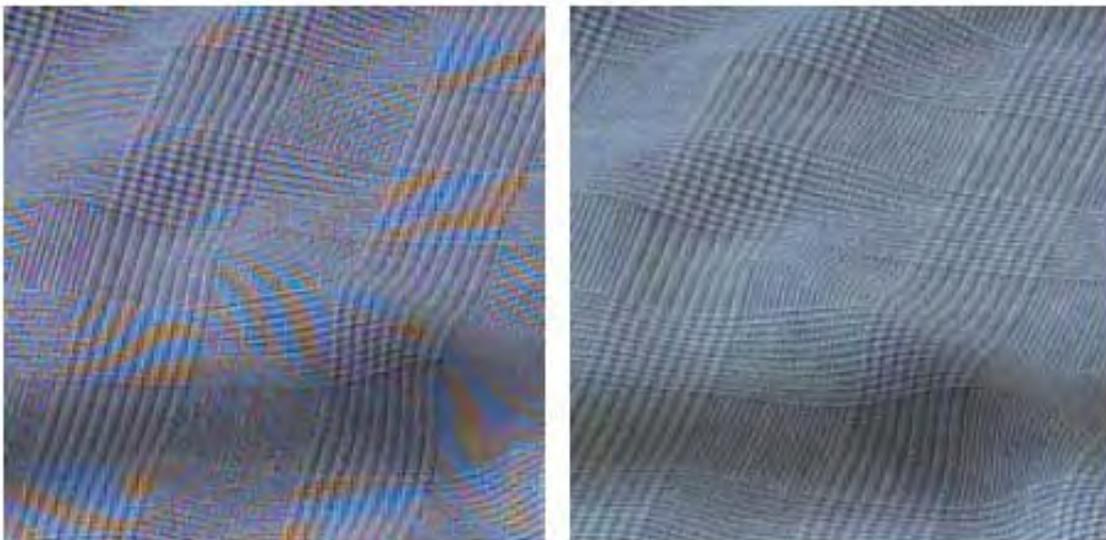
<sup>32</sup> vgl. ebd., 12ff



**Diagramm 2-4: eine von der Wellenlänge abhängige Absorptionstiefe**

Das Ergebnis sind Sensoren mit besserer Farbtreue und Auflösung, da nicht wie bisher immer ein Großteil des Lichts durch Filterung verworfen werden muss. Außerdem erspart man sich aufwendige Algorithmen, die die Farbinformation wieder vereinen und kann so die Rechenleistung anderwärtig einsetzen.<sup>33</sup>

Polaroid (x530) und Sony (DS-9) haben bereits solche Sensoren verbaut, verlässliche Erfahrungsberichte stehen zwar noch aus, allerdings zeigt folgende Abbildung anhand eines typischen Farbbiasing Effektes, der bei hohen Detailfrequenzen oft auftritt, das Potential, welches in dieser Technik steckt.<sup>34</sup>



**Abbildung 2-9: Aufnahme mit einem Bayer-Mosaik (links) und einem Stacked Sensor (rechts)<sup>35</sup>**

<sup>33</sup> vgl. Göhring 2002, 31

<sup>34</sup> vgl. Gilblom, Keun Yoo, Ventura 2003, 2f

<sup>35</sup> Foveon, Inc. 2002, 4

### 3. Bildrauschen

Bildrauschen ist nur eine der vielen potentiellen Fehlerquellen die im Laufe eines fotografischen Prozesses entstehen können. Wobei nicht zwangsläufig immer der Benutzer durch Falschanwendung für den Fehler verantwortlich sein muss. Manchmal liegt es auch ganz einfach an den unvermeidlichen kameraspezifischen Eigenheiten auf die der Benutzer mit adäquaten Gegenmaßnahmen reagieren muss.

Zu diesen Fehlern zählen:

- Unschärfe
- Objektkontrast
- Überschärfe
- Fehlerhafte Farbdarstellung (Weißabgleich, Farbwiedergabe)
- Vignettierung (Unterbelichtung der Ecken und Ränder durch Abschattung)
- Perspektivische Verzeichnung (verlaufende Kanten)
- ...

Im Gegensatz zu den dargestellten Problemen hat Rauschen die unangenehme Eigenschaft, zufällig und zum Teil auch unterbewusst zu geschehen. Damit sei gemeint, dass bis zu einem gewissen Teil Rauschen durchaus zu einem Bild gehört und nur unter bestimmten (unterbewussten) Umständen störend wirkt. Deshalb spricht man eigentlich auch nicht von Rauschbeseitigung, sondern lediglich von Unterdrückung bzw. Verminderung. Ein absolut rauschfreies Bild erweckt meist den Eindruck eines zu perfekten Abbildes der Wirklichkeit, mit der Folge, dass man als Betrachter Fehler in der Sättigung der Farben und dergleichen vermutet.

In manchen Bereichen eines Bildes erwartet man auch eine Art von Rauschen (=Auftreten von feinen undefinierten Details), wie zum Beispiel bei der feinen Struktur von Haaren oder Haut. Würde es hier (übermäßig) entfernt werden, so entstünde ein Effekt, den man als „Blind Area Artifacting“ bezeichnet.

*„The unnatural impact of Blind Area Artifacting occurs because the human eye expects certain details to be present in areas that no longer have the necessary detail, creating a ‚blind‘ area of detail.“<sup>36</sup>*

---

<sup>36</sup> nik multimedia, Inc. 2003a, 21

Um bei dem Beispiel der Haut zu bleiben, würde das den Eindruck erwecken, die Person wäre sehr stark mit Make Up überschminkt und man vermisst deshalb die natürlichen Hautporen.

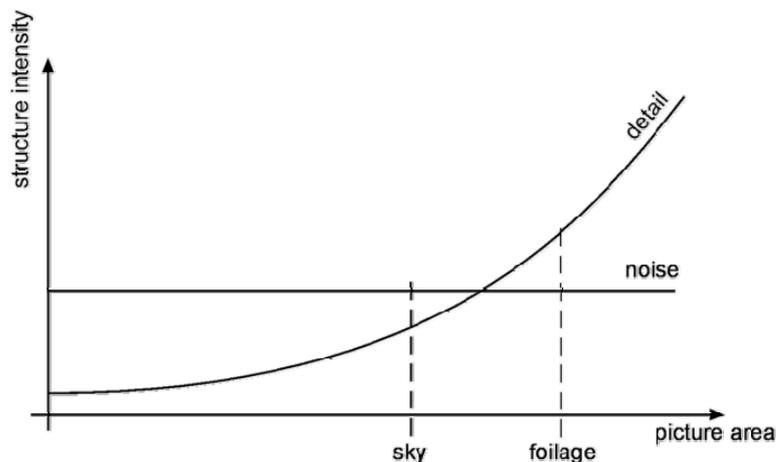


**Abbildung 3-1: Blind Area Artifacts (die Schärfe nahe der Lippe ist erhalten)**

Wie das Betrachten von optischen Täuschungen recht anschaulich feststellen lässt, kann man das Auge leicht in die Irre führen, oder anders gesagt, hängt die Wahrnehmung sehr oft von den Umgebungsvariablen ab. Beim Auftreten von Rauschen und dessen Sinneswahrnehmung verhält es sich sehr ähnlich. Das soll heißen, dass dasselbe Rauschen auf zwei komplett verschiedenen Bildern unterschiedlich stören, ja sogar auf nur einem der beiden überhaupt wahrgenommen werden kann.

So wird Rauschen auf einem blauen Himmel sehr bald negativ auffallen, während es am Boden umgeben von einem vielfarbigen Herbstlaub kaum Beachtung findet. Würde man nun aus dem gesamten Bild die Fehlinformationen entfernen, würde zwar der Himmel den Ansprüchen des Betrachters genügen, der Laubboden aber wahrscheinlich „zu aufgeräumt“ aussehen. Man spricht in diesem Zusammenhang davon, dass die Details des Laubes das Rauschen schlucken und so zu einem Teil des Gesamteindrucks werden.

Folgendes Abbild soll diese Überlegung veranschaulichen:



**Diagramm 3-1: Das Verhältnis von Detail zu Rauschsignal entscheidet**

Das Rauschen sei über das ganze Bild gleichmäßig verteilt (eine nicht unbedingt immer zutreffende Annahme). Während im Bereich des Himmels das Rauschen die wenigen vorhandenen Details überstrahlt, gehen sie im Laub sprichwörtlich unter.<sup>37</sup>

Entscheidend ist also nicht unbedingt, ob Rauschen an sich vorhanden ist, sondern vielmehr ob „genug“ Nutzsignal vorhanden ist, um die Fehler zu überschatten. Deshalb funktioniert auch simple Verstärkung von schwachen Signalen nicht, denn solange bei der Verstärkung keine Differenzierung zwischen Nutz- und Rauschsignal getroffen werden kann, werden die Störungen ebenso mitverstärkt und das Verhältnis bleibt gleich. Im schlimmsten Fall erreicht das Signal eine Sättigung und das Rauschen nähert sich immer mehr dem Signal an.

#### Doch wie definiert sich nun Bildrauschen wirklich?

Nik multimedia inc., einer der führenden Hersteller von Rauschunterdrückungssoftware (Dfine) wartet mit einer unwissenschaftlichen Erklärung auf: Rauschen „[...] besteht aus Fotodetails, die nicht so erscheinen, wie es eigentlich beabsichtigt war. Diese winzigen, aber höchst lästigen Störungen wirken wie heller, farbiger oder dunkler ‚Funkenregen‘.“<sup>38</sup>

Wikipedia nennt es pragmatisch „[...] ein ungelöstes technisches Problem in der Digitalfotografie.“<sup>39</sup>

<sup>37</sup> vgl. ebd., 23

<sup>38</sup> nik multimedia, Inc. 2003b, 9

<sup>39</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Bildrauschen> (03. 06. 2005)

Ganz so schlimm ist es dann doch nicht, denn immerhin beschäftigt man sich mit der Problematik des Rauschens, das ja nicht nur in der Digitalfotografie existiert, schon seit Ewigkeiten. Deshalb kann man von folgenden allgemeinen Annahmen bezüglich Rauschens ausgehen:

1. Man kennt im Prinzip sämtliche Quellen, die zu einem Rauschen führen können und hat den Fertigungsprozess der Chips so weit unter Kontrolle, um die meisten Rauschquellen zu beseitigen.
2. Man hat mathematische Funktionen entworfen, um deren Auftreten beschreiben und durch geeignete Filterung entfernen zu können.

Ad 1.) das ist die hardwareseitige Annäherung an das Thema (meist in der Kamera)

Problem: die einzelnen Rauschquellen sind zu meist konträr. Wird eine Maßnahme getroffen um Rauschen X zu eliminieren, erhöht sich Y, und umgekehrt. Deshalb wird bei Rauschen auch von einem ganzheitlichen Problem gesprochen, und ist nicht bloß eine Frage der einzelnen Komponenten.

Ad 2.) die softwareseitige Annäherung (nach dem Aufnahmeprozess – sowohl innerhalb als auch außerhalb der Kamera)

Durch digitale Filter und einer örtlichen Faltung (spatial convolution) können hochfrequente Störungen herausgefiltert werden.

Problem: funktioniert nur zum Teil zufrieden stellend, wichtig hierbei ist es, ein hinreichend exaktes Modell des Rauschverhaltens zu finden (entweder durch experimentelle Annäherung, durch Information über das Bild oder durch simple Schätzung)

Anmerkung: wie später ersichtlich wird, wird auch bereits in der Kamera mittels Software Rauschunterdrückung praktiziert, dennoch hat es immer einen hardwarenahen Zugang – deshalb der Terminus „hardwareseitige Annäherung“

### 3.1. Rauscharten

Folgendes Kapitel soll die verschiedenen Rauschversionen von der Benutzerseite beschreiben, also deren charakteristisches Aussehen und Aufttrittsbedingungen. Gerade für Fotografen, sprich Leute, die wirklich damit konfrontiert sind, scheint mir dieser Ansatz wesentlich nahe liegender zu sein, als eine Störung mittels PDF (Probability Density Function) zu erklären. Im 4. Kapitel, das sich mit den Unterdrückungsalgorithmen beschäftigt, wird dann der Konnex zu den Bezeichnungen hier gebildet.

Leider gibt es bei der Beschreibung der unterschiedlichen Rauschquellen keine einheitliche Nomenklatur, weshalb jede fachliche Abhandlung seine eigenen Bezeichnungen anwendet. Des Weiteren werden oftmals an sich verschiedene Rauscharten verknüpft, da sie nur in Kombination auftreten, andere Fachblätter wiederum trennen diese. Aus diesen Gründen stellt die folgende Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit, beziehungsweise nimmt bewusst gewisse Überlappungen und Doppeldeutigkeiten zwecks einer umfassenderen Darstellung in Kauf.

Die nachfolgenden Rauschvarianten lassen sich generell in 2 Kategorien aufteilen:

- **Random Noise (Temporal Noise)**

...ist das, was man „landläufig“ als Rauschen bezeichnen würde. Es tritt zeitlich und örtlich zufällig auf und kann so auch nicht vorher berechnet werden (sondern lediglich durch mathematische Wahrscheinlichkeiten beschrieben). Durch dieses zufällige Auftreten bietet es aber die Möglichkeit sich durch eine Mittelung zweier oder mehrerer zeitlich aufeinander folgender Bilder weitgehend eliminieren zu lassen. Allerdings stellt sich hier das Problem der Geschwindigkeit, denn kaum ein Objekt steht lange genug still um auf 2 Motiven gleich zu erscheinen.

Ausnahme: Astronomiefotografie – es werden zig Fotos erzeugt und überlagert (Stacking).

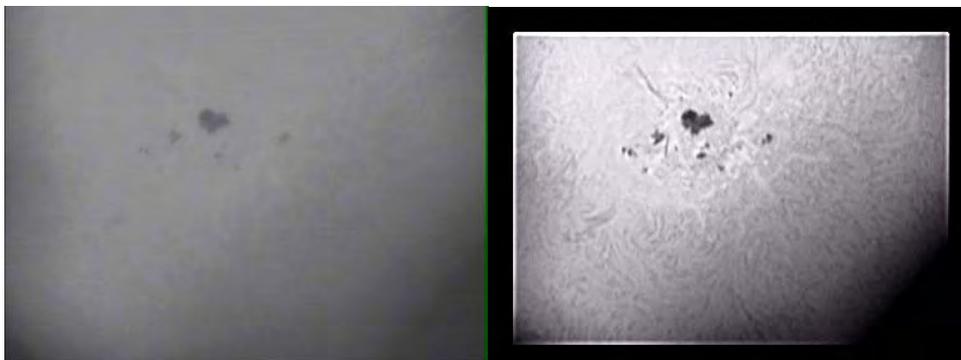


Abbildung 3-2: ein Einzelbild von 400 (links), das erstaunliche Ergebnis (rechts)<sup>40</sup>

<sup>40</sup> Quelle: <http://www.silvia-kowollik.de/astro/webcam/giotto.htm> (03. 06. 2005)

- **Pattern Noise (Spatial Noise)**

... ist ein Rauschen, das einem Muster folgt. Ändert sich nicht, oder zumindest nur kaum von Bild zu Bild, weshalb es auch nicht durch zeitliche Mittelung rausgerechnet werden kann. Dafür lässt sich eine Voraussage über dessen Auftreten treffen und sich dementsprechend korrigieren.

Unabhängig davon kann man Rauschen auch noch nach dessen optischen Auftreten unterscheiden, denn je nach dem differieren die Analyse- und Reduktionsmethoden.

- **Luminanzrauschen (Helligkeitsrauschen)**

Die Fehlinformation liegt hier alleinig in den Helligkeitswerten der einzelnen Pixel vor. Sie haben keine Farbe und manifestieren sich in dunkleren und helleren Grautönen.

- **Chrominanzrauschen (Farbrauschen)**

Sobald in den Störungen Farben involviert sind, spricht man von einem Chrominanzrauschen. Wie in Abbildung 3-3 ersichtlich, bewegt sich das Rauschspektrum vor allem im blauen Bereich, was aus der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen, verringerten Empfindlichkeit und somit verbundenen Verstärkung des Blauanteils resultiert.

Diese Trennung von Helligkeits- und Farbanteilen seitens des Rauschens führt auch dazu, dass Rauschunterdrückungsprogramme oft im LAB- oder im YCrCb Farbraum arbeiten (anstatt des RGB oder CMYK), die genau diese Trennung von Helligkeit und Farbe vollziehen und sich somit separat behandeln lassen.

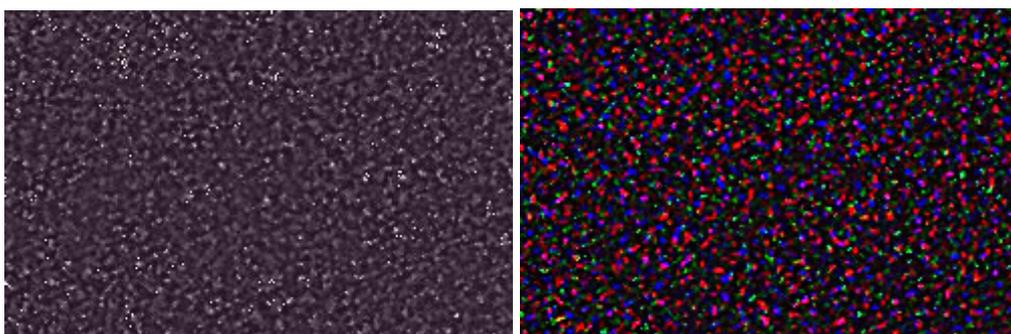


Abbildung 3-3: Luminanz- (links) und Chrominanzrauschen (rechts) - Levels angepasst

### 3.1.1. Photonenrauschen – Photon (Shot) Noise

Photonenrauschen ist der häufigste und gleichzeitig der offensichtlichste Rauschfaktor in digitalen Bildern. Noch dazu auch der einzige den man nicht (auch nicht theoretisch) eliminieren kann.

Hervorgerufen wird es durch das zufällige Auftreffen von Photonen (die in der Natur auch nur unregelmäßig emittiert werden) auf die lichtempfindliche Oberfläche des Chips. So kann man nicht von einer fixen Menge an Photonen in zwei zeitlich aufeinander folgenden aber unabhängigen Intervallen sprechen, sondern muss immer eine durchschnittliche Menge betrachten. Und da moderne Chips sensitiv genug sind, einzelne Photonen mit einer Energie von rund  $4 \cdot 10^{-19}$  Joule zu detektieren (siehe Eigenschaften von Sensoren) hat diese statistische Schwankung (nach einer Poisson-Verteilung) durchaus Einfluss auf das endgültige Bild. Deshalb ist diese Unregelmäßigkeit auch bis zu einem gewissen Teil ein fixer Bestandteil jedes Bildes und macht sich in Form von helleren oder dunkleren Pixeln bei an sich gleichmäßig beleuchteten Szenen (z. B. Himmel) bemerkbar. Diese Bereiche werden aufgrund der natürlichen Gesetzmäßigkeiten nicht vollständig uniform von Photonen getroffen und sind somit verrauscht.

Es ist auch wichtig zu verstehen, dass selbst bei Beseitigung sämtlicher anderer Rauschquellen, diese statistisch zufällige Auftrittswahrscheinlichkeit ein endliches Rauschen und somit auch stets nur ein endliches Signal zu Rauschverhältnis ergeben kann.<sup>41</sup>

Prinzipiell besteht zwar ein proportional direkter Zusammenhang von einfallender Lichtmenge und Photonenrauschen (welches schließlich vom Licht verursacht wird), dennoch zeigt sich bei ausreichend starker Belichtung ein gegenläufiger Effekt. Durch die insgesamt hohe Anzahl an aufsummierter Photonen kann die natürliche Schwankung vernachlässigt werden.

### 3.1.2. Read(out) Noise – Bias Noise – Verstärkerrauschen

Diese Form des Rauschens rührt von der Tatsache, dass dieselbe Anzahl von Ladungen nie zweimal zu demselben Ergebnis führen wird. Diese vielleicht etwas verwunderliche Aussage über Ungenauigkeit trifft de facto bei jedem Verstärkungsprozess (auch etwa in der Audiotechnik) zu und liegt einfach daran, dass bis dato kein perfekter Verstärker

---

<sup>41</sup> vgl. Young, Gerbrands, van Vliet 1998, 32f

erfunden wurde. Wie bei vielen Rauschquellen machen die thermischen Bewegungen der Elektronen in den Widerständen des Verstärkers einen Strich durch die Rechnung und sorgen für statistische Schwankungen im Verstärkungsfaktor. Neben Sensorkühlung (siehe Abbildung 3-5) ist die einzige praktikable Reduzierungsmöglichkeit, das Verstärkungslevel über die Wahl eines des ISO-Levels an der Kamera niedrig zu halten (eine Halbierung der Empfindlichkeit ergibt eine Halbierung des Rauschens).

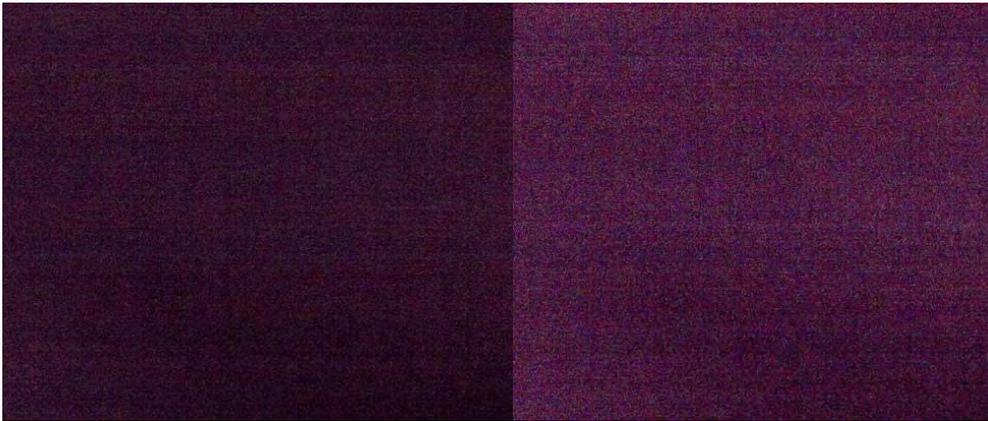


Abbildung 3-4: Read Noise bei ISO 1600 (links), bei ISO 3200 (rechts) – Levels angepasst<sup>42</sup>

Dieses Ausleserauschen ist prinzipiell unabhängig vom Signal, steigt aber mit der Frequenz mit der die Register ausgelesen werden. Die Chiphersteller haben diesen Zusammenhang erkannt und Wege entwickelt (mehrere Ausleseregister parallel führen zu einer geringeren zeitlichen Belastung eines jeden einzelnen) dieses Rauschmaß merklich nach unten zu drücken. Beispielgebend sei hier Hamamatsu mit ihrem so genannten Multiport CCD erwähnt.

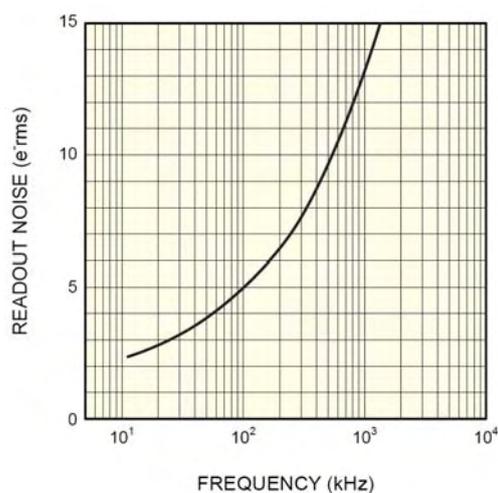


Diagramm 3-2: Readout-Noise in Abhängigkeit der Frequenz

<sup>42</sup> Medkeff 2004, 6

Dieses Störungsbild wird auch oft in einem Atemzug mit dem Quantisierungsrauschen beschrieben, dass von der endlichen Abbildungsgenauigkeit der analogen kontinuierlichen auf die diskrete digitale Welt rührt. So lassen sich zum Beispiel die unendlichen Möglichkeiten der Lautstärke eines Signals lediglich in 256 (bei 8 Bit) Stufen einteilen. Diese Ungenauigkeit führt zu Störungen, die das endgültige Ergebnis negativ beeinflussen. In der Audiotechnik hat man den Vorteil, dass das Ohr diese Abweichungen nicht auflösen kann und somit vernachlässigt werden können. Auch hier, in der Digitalfotografie spielt diese Rauschquelle, verglichen mit den anderen, eine untergeordnete Rolle.

### 3.1.3. Fixed Pattern Noise (FPN)

FPN ist im Prinzip der Überbegriff für eine Art von Rauschen, welches im Vergleich zu den bisher diskutierten nicht komplett zufällig ist, sondern wie der Name schon sagt einem gewissen Muster (= Pattern) entspricht.

Hauptsächlich stammt der Fehler von der pixelseitigen uneinheitlichen Größe, Abstand, Integrationszeit der Photonen oder Effizienz (PRNU = Photo Response Non Uniformity) am Sensor, die herstellungsbedingt unvermeidbar sind.

Diagramm 3-3 zeigt eine solche Abweichung über die Pixelfläche hinweg in relativen Prozent.

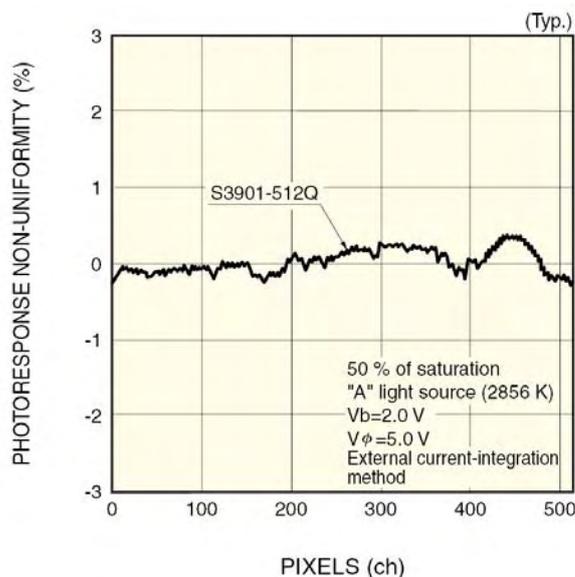


Diagramm 3-3: typisches PRNU eines CMOS-Sensors

Grundsätzlich ergibt sich das aus dem photoelektrischen Prozess erhaltene Signal in der Form von

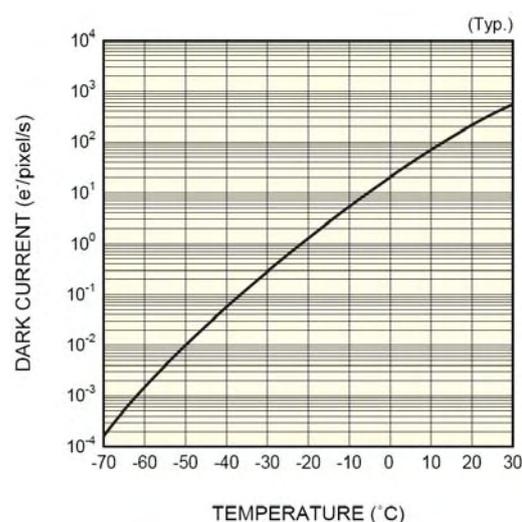
$$output = gain * signal + offset \quad (2)$$

wobei sich Fixed Pattern Noise in Form von Verstärkungsfaktorabweichungen (gain) unterschiedlichen Offsets manifestiert. Diese Erscheinung tritt vor allem bei CMOS-Sensoren auf, die für jeden Pixel eine eigenen Verstärkungsschaltkreis und die damit verbunden Probleme mit sich bringen. Aus diesem Umstand resultiert auch die jahrelange geringe Akzeptanz gegenüber diese Art von Sensoren.

Wie später bei den hardwareseitigen Unterdrückungsmöglichkeiten ersichtlich werden wird, gelingt es aber durch Subtraktion jedes einzelnen Pixels das Offset-Problem äußerst gut in den Griff zu bekommen (Stichwort CDS). Allerdings stellen die Abweichungen im Verstärkungsfaktor nach wie vor ein schwerwiegendes Problem dar, dessen Beseitigung sich zahlreiche Studien zum Thema gemacht haben.<sup>43</sup>

### 3.1.4. Dark Current (Shot) Noise

Dunkelstrom (Dark Current) resultiert aus den Unreinheiten und Unregelmäßigkeiten der Silikonschicht der Sensoren. Diese Einschlüsse ermöglichen es Elektronen unmotiviert vom Valenz- in das Leitungsband zu geraten (was an sich nur durch Einfluss von Licht möglich sein sollte) und so zu einem Stromfluss zu führen (= Dunkelstrom). Zu diesem Sprung benötigen sie aber die thermische Bewegungsenergie, die mit sinkender Temperatur abnimmt. (siehe 3.1.6. thermisches Rauschen)

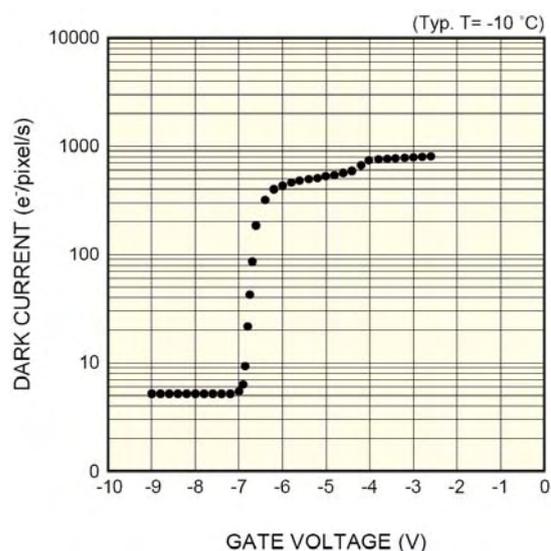


**Diagramm 3-4: Dunkelstrom in Abhängigkeit der Temperatur**

<sup>43</sup> Lim, Gamal (2002)

Diese überschießende Ladung (Shot Noise), die an sich schon eine Rauschquelle bedeutet, stellt in Kombination mit der Ungleichmäßigkeit des Dunkelstroms selbst, besonders bei geringer Belichtung und daraus resultierender langer Belichtungszeit (doppelte Belichtungszeit = doppeltes Rauschen) ein großes Problem dar. Denn während man zumindest den unregelmäßigen Dunkelstrom rausfiltern kann (durch Subtraktion, siehe FPN), ist das Shot Noise zufälliger Natur und bleibt bestehen.<sup>44</sup>

Da aktive Sensorkühlung in den seltensten Fällen praktikabel ist, sind die Entwickler auf der Suche nach anderweitigen Lösungen. So zum Beispiel die Multi Pinned Phase (MPP) Technik von Hamamatsu, die mit einer gesteigerten negativen Gatespannung die Elektronen am Überspringen zu hindern vermag.<sup>45</sup>



**Diagramm 3-5: Dunkelstrom in Abhängigkeit der Gatespannung**

Nachteil dieser Idee ist die reduzierte Full Well Capacity (höchste mögliche Sättigung) die sich negativ auf die erreichbare Dynamik auswirkt. Hersteller wie Fairchild haben aber auch hier bereits reagiert und ein Verfahren entwickelt um dem entgegenzuwirken.<sup>46</sup>

### 3.1.5. Hot/Cool Pixeling – Point defect – White/Black Spot

Ein ähnliches Erscheinungsbild zu dem FPN hat das so genannte Hot- beziehungsweise Coolpixeling, bei dem quasi einzelne Pixel nicht nur ungenau arbeiten, sondern vielmehr bereits zerstört sind. Auch das kann zum Beispiel durch Überladung, fertigungstechnische Mängel oder einfach nur durch Verunreinigung der Oberfläche (Staub) entstehen. Ebenso

<sup>44</sup> vgl. Eastman Kodak Company 2005, 6

<sup>45</sup> vgl. Hamamatsu 2003, 14

<sup>46</sup> vgl. Fairchild Imaging 2004, 4

trägt das Alter maßgeblich zur Häufigkeit von Fehlpixeln bei. Allerdings genügt es hier nicht einfach den Dunkelwert abzuziehen, denn dieser Fehler ist signalunabhängig (hat meist ständig Voll- oder Nullausschlag), und so existiert kein verwertbares Signal mehr. Aus diesem Grund definiert man einen Schwellwert, der bei gleichmäßiger Beleuchtung (sowohl weiß als auch schwarz) nicht überschritten werden darf (meist um die 3% zum Sollwert). Schlagen einzelne Pixel, oder auch ganze Gruppen (Cluster- und Columndefekte) bei diesem Kriterium an, so werden sie meist durch Mittelung mit den benachbarten ausgeglichen.<sup>47 48</sup>

Product	Grade	Blemish Specifications			
		Point Defects	Column Defects		Cluster Defects
			Total	Max Adjacent	
CCD486 4k x 4k CCD 15µm pixels	1	200	5	2	25
	2	400	10	3	50
	3	800	>10	>3	100

Tabelle 3-1: Fehler-Spezifikation eines CCD-Datenblatts (CCD486 von Fairchild Imaging / bei -60°C)

Häufig werden Chips nach deren maximal zulässigen Anzahl von Fehlerpixel in Kategorien unterteilt, nach denen sich der finale Verkaufspreis richtet.

### 3.1.6. thermisches Rauschen – thermal Noise

Dieses Rauschen existiert als solches zwar nicht direkt auf dem resultierenden Bild, ist aber die Grundlage für die meisten der bisher genannten Rauscharten (so zum Beispiel dem Read Noise).

Grundsätzlich rührt es von den thermischen Bewegungen der Elektronen, die mit steigender Temperatur zunehmen. In der Regel spricht man von einer Verdopplung der Störungen bei einem Temperaturanstieg von etwa 7–10 °C. Aufgrund seines molekularen Zusammenhangs ist es ein weißes Rauschen, was bedeutet, dass es über alle Frequenzen konstante Energie aufweist und so über das ganze Bild, egal ob detailarm oder –reich, gleich verteilt ist.

Einzig Abhilfe schafft hier aktive Kühlung, welche unter Inkaufnahme von erhöhtem Stromverbrauch und einer Gewichtszunahme zwar fabriziert wird, meist aber nur in stationären- oder astronomischen Kameras Verwendung findet.

<sup>47</sup> vgl. Hamamatsu 2003, 18

<sup>48</sup> vgl. Schindler 2004, 4

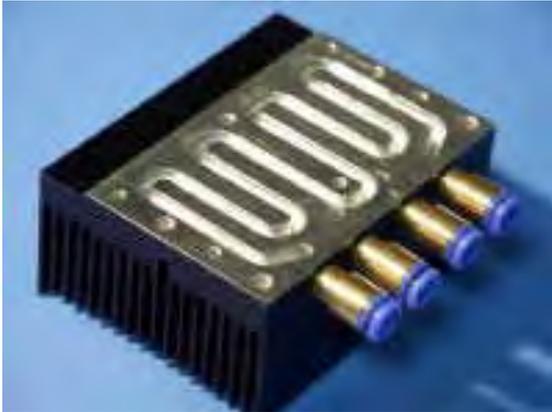


Abbildung 3-5: Flüssigkeitskühlung für Astronomiekameras<sup>49</sup>

Zu erwähnen sei in diesem Zusammenhang auch noch, dass Temperaturabhängigkeit nicht nur bedeutet, dass man im Winter bei Außenaufnahmen weniger Rauschen erkennen wird, als im Sommer (was tatsächlich der Fall ist). Sondern auch, dass die interne Erwärmung der Kamera durch Strom führende Teile, Display und dergleichen so groß ist, dass das Rauschen im direkten Zusammenhang mit der Einsatzdauer steht.

### 3.1.7. Reset Noise – kTC Noise

Letztlich sei noch eine Rauschart angeführt, die ebenfalls zufälliger Natur ist und direkt vom thermischen Rauschen beeinflusst wird.

Grundlegendes Problem hier ist, dass prinzipiell nach jedem Auslösevorgang der Sensorlevel (repräsentiert durch eine Kondensatorspannung) auf 0 (beziehungsweise auf ein bestimmtes Spannungslevel) zurückgesetzt werden muss. Das passiert zwar auch, allerdings wie bereits beim Pattern Noise gezeigt, treten auch hier Unregelmäßigkeiten auf (zurückzuführen auf thermisches Rauschen), die zu einem unterschiedlichen Level der Nullsetzung führen. Klar ersichtlich, dass hier eine potentielle Rauschquelle präsent ist.

Formal gesehen ergibt sich dieser Fehler folgendermaßen:

$$V_{kTCNoise} = \sqrt{\frac{kT}{C}} \quad \begin{array}{l} V_{kTC-Noise} = \text{Rauschspannung} \\ k = \text{Boltzmann Konstante} \\ T = \text{Chip Temperatur [K]} \\ C = \text{Gate Kapazität des MOSFET Verstärkers} \end{array} \quad (3)$$

Leicht ersichtlich ist hier auch der direkte Einfluss der Temperatur auf die resultierende Rauschspannung.<sup>50</sup>

<sup>49</sup> Quelle: [http://sternwarte-moembris.de/CCD%20Kamera/body\\_body\\_platinum\\_x1.htm](http://sternwarte-moembris.de/CCD%20Kamera/body_body_platinum_x1.htm) (03. 06. 2005)

<sup>50</sup> vgl. Hornsey 1999c, 126f

Diese beim Reset-Vorgang verbleibende Spannung hat auch direkt mit der im Kapitel Eigenschaften von Sensoren kurz erwähnten CTE zu tun, die angibt wie „sauber“ die Ladung beim Auslesen von Zelle zu Zelle weitertransportiert werden kann.

### **3.1.8. sonstige Rauscharten**

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Quellen gibt es, wie eingangs bereits erwähnt, noch eine Vielzahl anderer Bezeichnungen für Rauschquellen, die zum Teil in den forschenden Unternehmen intern verwendet werden, oder einfach nur aus Präzisionsgründen weiter aufgeteilt werden. Zum Beispiel teilt sich das thermische Rauschen nochmals in „White Noise“ (Johnson Noise) und „Flicker-Noise“ (1/f Noise), die der Ursache des Rauschens noch weiter auf den Grund gehen.

Es wird an dieser Stelle absichtlich darauf verzichtet sämtliche dieser Bezeichnungen aufzuführen, denn die zur Diskussion stehenden Arten wurden bereits bestmöglich aufgelistet und zu detailreiche Erklärungen würden nur zur Verwirrung beitragen und den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

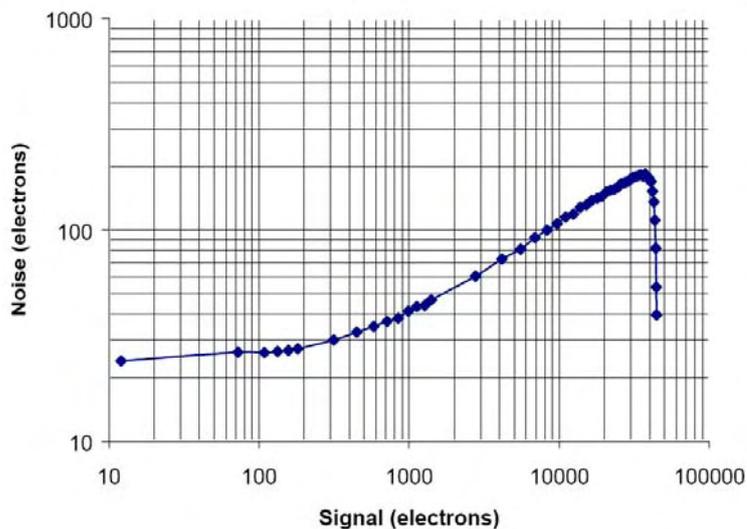
## **3.2. Signal- zu Rauschverhältnis**

Wie schon des Öfteren in den vorigen Kapiteln angedeutet, spricht man in der gesamten Messtechnik immer nur von dem Verhältnis des verwertbaren Signals zum Rauschsignal. Schließlich gibt nur dieser erreichte Abstand Aufschluss über die Auswertbarkeit des vorliegenden Signals. Wie bereits im Kapitel 2.1.5 dargelegt, ist es rein technisch auch nicht möglich ein absolut rauschfreies (= ohne ungewollte Störungen vorhandenes) Signal zu erreichen. Während man in der Signaltechnik (zum Beispiel Mobilfunk) mit immer ausgefeilteren Algorithmen daran arbeitet, mit geringeren Abständen auszukommen um das Nutzsignal doch noch fehlerfrei extrahieren zu können, bleibt in der Digitalfotografie nichts anderes übrig, als das Rauschen möglichst zu dezimieren. Denn schließlich lässt sich das Auge nicht auf Unempfindlichkeit gegenüber Rauschen trimmen. Allerdings hilft es durchaus die Eigenheiten der visuellen Wahrnehmung zu kennen und dementsprechend Reduzierungsmaßnahmen anzuwenden.

Neben der Minimierung von Rauschen führt selbstverständlich auch die Maximierung des Nutzsignals selbst noch zu dem gewünschten Effekt der Abstandmaximierung. Doch wie bereits dargelegt, führt simple Verstärkung aus zweierlei Gründen nicht zu dem Ziel (Mitverstärkung des Rauschens, Verstärkerrauschen selbst), weshalb nur die Vergrößerung

der sensitiven Fläche in Betracht kommt. Daraus erklärt sich auch das Faktum, dass Profikameras mit einem Full Frame-CCD Chip (Kleinbildgröße) ein wesentlich besseres Rauschverhältnis haben als kleine  $\frac{1}{4}$ “-Chips. Zwar bleibt das absolute Rauschen gegenüber einem kleineren Sensor gleich, doch ist das Signal (mehr Fläche – mehr Licht – mehr Ladung) und damit auch das SNR wesentlich besser.

Diagramm 3-6 zeigt wie sich das Rauschen in Abhängigkeit der Signalstärke ändert. Diese Übertragungskurve wird als „Photon Transfer Curve“ bezeichnet. Aus ihr kann man nicht nur die untere Wahrnehmungsschwelle (Noise Floor), sondern auch den Sättigungsbereich herauslesen, womit sich wie in 2.1 gezeigt, der Objektkontrast errechnen lässt. Ermittelt wird diese Kurve durch zahlreiche bei gleicher Belichtungszeit aufgenommene Szenen einer weißen Fläche, wobei vom Mittelgrauwert zu weit abweichende Pixel als Rauschen gezählt werden.



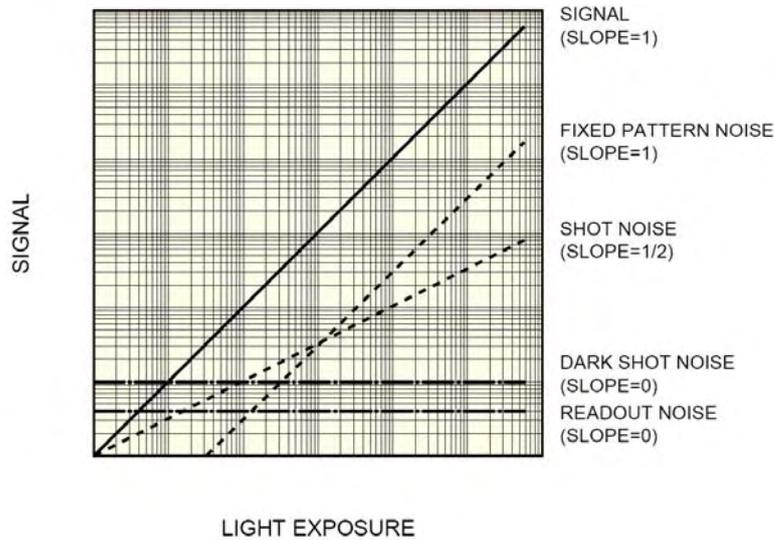
**Diagramm 3-6: Das Rauschen in Abhängigkeit der Signalstärke**

Wie in dem Datenblatt<sup>51</sup>, aus dem diese Kurve stammt dargestellt wird, kann man die Kurve in 3 Bereiche unterteilen:

Der untere Teil (bis ca. 200 e<sup>-</sup>) verläuft relativ linear und flach. Durch eine Verlängerung nach links kann man den Noise Floor ermitteln, der sich bei ca. 25 Elektronen einpendelt. Der Mittelteil steigt mit einer Steigung von ca. 0,5 an und repräsentiert die Rauschlimitierung hervorgerufen durch das Photonen-Rauschen. Das letzte Drittel steigt mit einer direkten Steigung von 1 an und stellt die Limitierung des Pattern Noise (siehe 3.1.3) dar.

<sup>51</sup> Eastman Kodak Company 2001, 8

Diese Aussage deckt sich auch mit den Angaben in dem Datenblatt von Hamamatsu (Characteristics and use of FFT-CCD area image sensors), das folgendes Diagramm liefert.

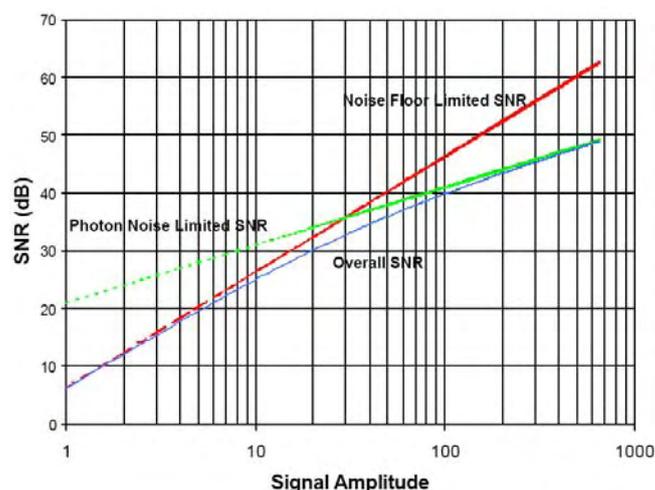


**Diagramm 3-7: dominierende Rauschquellen als Funktion der Belichtung**

Zusätzlich erkennt man bei dieser schematischen Darstellung auch, dass bei sehr schwacher Belichtung das Rauschen (in dem Fall das Dark Shot- und das Readout Noise) über dem des Signals liegen. Auch ersichtlich anhand der in Diagramm 3-6 dargelegten Werte im unteren Bereich, wenn etwa ein Signallevel von  $12 e^-$  einem Rauschen von  $24 e^-$  gegenübersteht.

Das Readout- und Dark Shot Noise sind über die einfallende Lichtmenge hin konstant, was aus der Tatsache resultiert, das Ersteres alleinig von der Auslesemethode determiniert wird und Zweiteres ausschließlich über die Belichtungszeit ansteigt, die aber bei der Ermittlung solcher Diagramme konstant gehalten wird. Um dennoch die Anzahl der auftreffenden Photonen verändern zu können, wird die Leuchtzeit der Lichtquelle variiert.

Als dritte Visualisierung dieser entscheidenden Kenngröße SNR folgt noch ein Diagramm von Hewlett Packard, das eine Übersicht eines typischen CMOS SNRs liefert.



**Diagramm 3-8: SNR als Ergebnis mehrere Rauscheinflüsse**

Hier wird einem auch anschaulich vor Augen geführt, dass der endgültige Signalabstand ein Ergebnis des jeweils schlechtesten SNR's (Photonenrauschen, FPN, Dark Shot Noise) darstellt.

Der Anstieg des Photonen SNR's zeigt sich mathematisch durch folgende Gleichung:

$$SNR = 10 \log(\rho T) \quad \rho = \text{Photonen Intensität [photonen/s]} \quad (4)$$

$$T = \text{Time Interval [s]}$$

Diese Annahme bewahrheitet sich aber nur bis zu einer gewissen Signalstärke ( $\rho T \approx 10^5$ ), denn wie bereits angedeutet, ist die natürliche Photonstreuung dann zu vernachlässigen und das SNR steigt steiler an.<sup>52</sup>

Das Gesamttrauschen errechnet sich für die jeweilige Situation (Temperatur, Belichtung, Zeit, ...) aus folgender Gleichung:

$$N_t = \sqrt{N_f^2 + N_s^2 + N_d^2 + N_r^2} \quad (5)$$

$N_t = \text{Total Noise}$

$N_f = \text{Fixed Pattern Noise}$

$N_s = \text{Photon Shot Noise}$

$N_d = \text{Dark Current Noise}$

$N_r = \text{Readout Noise}$

Abbildung 3-6 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Rauschquellen, die während des Prozesses der Lichtausbeute eintreten können.

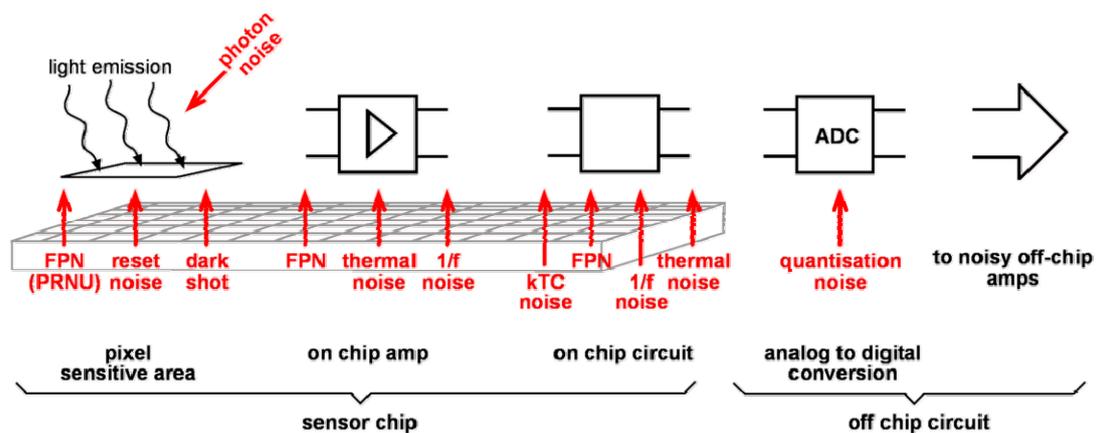


Abbildung 3-6: Überblick über die wichtigsten Rauschquellen<sup>53</sup>

Zur effektiven Rauschverminderung (auf Hardware-Seite) ist es vor allem wichtig die Quellen vor der ersten Verstärkung zu bekämpfen, denn das schwache Signal an dieser Stelle entscheidet maßgeblich über die Güte des endgültigen Bildes.

<sup>52</sup> vgl. Young, Gerbrands, van Vliet 1998, 33

<sup>53</sup> vgl. Hornsey 1999c, 131

## 4. Gegenmaßnahmen

Maßnahmen um Bildrauschen zu bekämpfen können so vielseitig sein, wie das zu Bekämpfende selbst. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass es sich um Dr. Scott Umbaugh (Professor an der Southern Illinois University at Edwardsville) zu zitieren, bei Image Restoration um „more of an art than a science“ handelt. Denn ähnlich zur Kunst ist es hierbei wichtig, ein Bild so zu gestalten, dass es dem Betrachter gefällt, und nicht unbedingt darum, mathematische Normen und Vorgaben exakt einzuhalten. Wie sich später bei den mathematischen Ansätzen zeigen wird (zu denen Dr. Umbaugh schon zahlreiche Bücher und Programme veröffentlicht hat) sieht ein theoretisch einwandfreies Bild nicht immer in Wirklichkeit auch nur annähernd so aus.

Deshalb spricht man auch bei nIK multimedia, inc. von einer „photographic perspective“<sup>54</sup>, wenn es darum geht Rauschen zu identifizieren und zu beseitigen. Deren Ansicht nach ergibt sich Rauschunterdrückung aus einer Kombination von den Umständen unter denen das Bild aufgenommen wurde (aus dem EXIF-Datensatz), der Natur des Rauschens und der damit verbundenen Bilddetails und der nicht wissenschaftlichen Wahrnehmungsweise des Menschens. Aus diesen Faktoren und deren Vielzahl an Variablen bleibt nur eine gültige Antwort, wenn es um den „Stein der Weisen“ im Zusammenhang mit Rauschverminderung geht: „Es hängt einfach vom Bild ab!“ So scheint ein Allheilmittel für jede Art von Bild für Rauschen (noch) nicht zu existieren. Denn sobald eine angewandte Routine versucht, Rauschen zu eliminieren, das eigentlich an dieser Stelle nicht vorhanden ist, tritt stets ein unerwünschter Nebeneffekt in Form von Detailverlust oder dergleichen auf. Allen Versuchen Rauschen zu minimieren liegt selbstredend zu Grunde, dass Details und der natürliche Gesamteindruck bestmöglich bewahrt werden müssen. (siehe auch Blind Area Artefacting – Kapitel 3)

Zu diesem Zweck wird eine effektive Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Rauschen und Detailinformation gesucht. Doch wie soll diese funktionieren? Sieht doch auf Pixelebene beides strukturell gesehen gleich aus! Sie unterscheiden sich allzu oft nur dadurch, wie sie das Auge wahrnimmt.

---

<sup>54</sup> nIK multimedia, Inc. 2003a, 4

Würde man Rauschen trivial als einen kleinräumigen Bereich definieren, der sich in der Farbe oder der Helligkeit eklatant von der Umgebung unterscheidet, so würde das all zu oft in einer fehlerhaften Behandlung des Bildes enden. Zum Beispiel stellen Sterne die grundlegende Detailinformation in einem Nachthimmel dar, und entsprechen dennoch genau der oben beschriebenen Definition des Rauschens.<sup>55</sup>

#### **4.1. Hardwarenahe Gegenmaßnahmen**

Wie an Abbildung 3-6 bereits andiskutiert, ist eine frühzeitige Rauschbehandlung der erste Schritt in Richtung eines rauschfreien Endprodukts. Denn muss aufgrund der geringen Energiemengen relativ bald verstärkt werden, werden auch die mit aufgenommenen Störungen erheblich angehoben. Aus diesem Grund praktizieren auch sämtliche Kamerahersteller eine mehr oder weniger erfolgreiche Strategie, das Rauschen (das – noch – unvermeidlich ist) bereits rechtzeitig in der Kamera zu beseitigen.

Wobei nicht immer Hardwareschaltungen, die mit elektrischen Potentialen und Taktfrequenzen agieren, die primäre „weapon of choice“ sind. Mittlerweile findet keine Kamera ohne zusätzliche Unterstützungssoftware das Auslangen, die ein gewisses Postprocessing auf sich nimmt. Deswegen ist es auch nicht weiter verwunderlich, dass mit Hilfe dieser verfügbaren Rechenleistung auch in Richtung Rauschbekämpfung Algorithmen implementiert wurden. Allerdings hat nik multimedia, inc. nicht ganz unrecht, wenn sie schreiben, dass eine Kamera nie den Rechenaufwand meistern könnte, den ein aktueller Rechner zu lösen vermag. Des Weiteren erwähnen sie in ihrem White Paper, dass ein frühzeitiger Informationsverlust, den eine unangepasste Rauschunterdrückung mit sich bringen würde, unwiederbringlich ist. Auch die zugegebenermaßen beschränkten Optionen und Vorschaumöglichkeiten, mit denen man bei einer Kamera rechnen muss (außer low, medium und high wird kaum eine Kamera Einstellungsmöglichkeiten bieten), stellen eine Softwarelösung als glorreiche Alternative hin. Zweifellos hat dieses Unternehmen Interesse daran, ihr Produkt „Dfine“ als beste Möglichkeit für professionelles Rauschmanagement darzustellen, weshalb sämtliche Argumente mit Vorsicht zu genießen sind. Allerdings räumen sie auch ein, dass der Vorteil des direkten Informationseinflusses von Aufnahmeparametern (ISO Einstellungen, Temperatur, ...) dem des Metadaten Datensatzes überlegen sind.

---

<sup>55</sup> vgl. ebd., 4f

### Exkurs: Metadaten

Zwar bereits 1995 ins Leben gerufen, bieten viele Bildbearbeitungsprogramme wie Photoshop in Verbindung mit Dateiformaten wie JPG oder TIFF erst seit 2002 die Möglichkeit Zusatzinformation zu dem Bild gezielt beizulegen. Aus dem Grund, um erstens eine bessere Nachkontrolle (Grund für Unterbelichtung, ...) über die Bilder zu bieten und zweitens auch die Möglichkeit ein Copyright mit einzubinden. Verbreitet sind das EXIF – Format (Exchangeable Image File) und das IPTC (International Press Telecommunications Council), welches wie der Name schon sagt von der Presse entwickelt wurde um Fälschungen von Bildern durch Verschlüsselung der Daten direkt in der Kamera vorzubeugen.

Als Informationen stehen allgemeine Daten wie Dateigröße, Name, Aufnahmedatum (≠ Bearbeitungsdatum) und dergleichen, aber auch kameraspezifische Merkmale wie Blende, Zoom, Brennweite, Weißabgleich, Blitzart und viele weitere zur Verfügung. Gerade Zweites wird oft zu Postprocessing Zwecken am Computer oder auch zur Kalibrierung für den Druck (= EXIF Print) eingesetzt. Denn mit den mitgelieferten Daten kann Nachschärfe oder zusätzlicher Weißabgleich dosiert eingesetzt werden. Moderne Profikameras bieten auch den „Luxus“, durch ein eingebautes GPS-Modul den Ort der Aufnahme mitzuprotokollieren.<sup>56</sup>

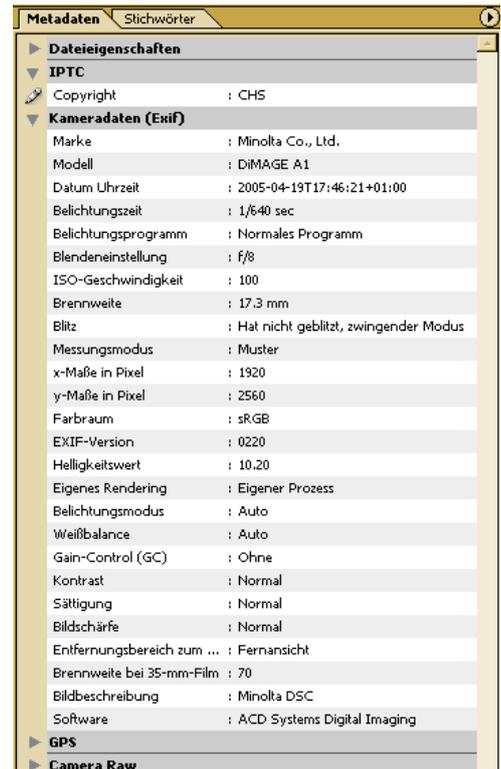


Abbildung 4-1: Die wichtigsten Metadaten

Genau solcher Metadaten eines Bildes bedienen sich Softwarelösungen, allerdings so wichtige Parameter wie Temperatur sind noch nicht vorgesehen, weshalb unter anderem hier die Lösung am Chip noch Vorteile hat.

Um noch einmal die Problematik der Systemoptimierung zu verdeutlichen, die es so schwierig macht, sämtliche Quellen am Chip zu eliminieren, will ich folgende Beispiele anführen:

<sup>56</sup> vgl. PCtipp 2004, 54ff

- Wie gezeigt, ist Photonen-Rauschen abhängig von den auftreffenden Photonen und somit von der Beleuchtungsstärke, die sich nicht ändern lässt. Außer durch Verringerung die Reaktivität, was natürlich nicht im Sinne des Erfinders sein kann.
- Dark Shot Noise hängt direkt mit dem Dunkelstrom zusammen, der durch Beeinflussung des Dotierungslevels im Chip verändert werden könnte. Doch auch hier wiederum nur auf Kosten der Effektivität.
- Ebenso könnte man die Pixelfläche reduzieren um den Dunkelstrom niedrig zu halten. Doch dann würde wiederum auch das Signallevel sinken und das SNR würde es im gleich tun.<sup>57</sup>
- Thermisches Rauschen teilt sich auf in White Noise und Flicker Noise, welche sich bezüglich der Größe des Verstärkers auf dem Chip gegensätzlich verhalten. „The goal of amplifier design is to find the lowest-noise compromise between competing geometries [...]“<sup>58</sup>

Aus diesen und noch eine Hand voll anderer Gründe ist ein ganzheitlicher Ansatz im Zusammenhang mit Chipdesign und Rauschverminderung gefragt.

Laut R. I. Hornsey von der University of Waterloo gibt es prinzipiell drei Arten von Rauschen – zumindest in Bezug auf Hardware Reduktionstechniken:

- Welche, gegen die praktisch nichts unternommen werden kann (wie zum Beispiel Photonen Rauschen)
- Welche, die sich durch sorgfältige Auswahl der verwendeten Komponenten beziehungsweise deren Design (Abmessungen) reduzieren lassen (zum Beispiel Thermisches Rauschen)
- Welche, die durch sorgsames (zusätzliches) Schaltungsdesign/-aufkommen vermindert werden können (etwa FPN)

Und so sollen in den folgenden Kapiteln verschiedene Verfahren andiskutiert werden, die einen bestmöglichen Kompromiss der in Frage kommenden Faktoren darstellen.

---

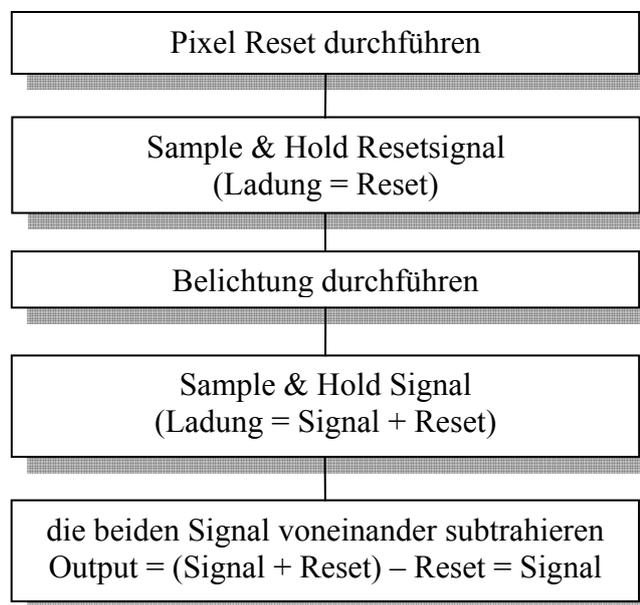
<sup>57</sup> vgl. Hornsey 1999c, 137ff

<sup>58</sup> Eastman Kodak Company 2001, 3

#### 4.1.1. Correlated Double Sampling (CDS)

Diese Technik ist mittlerweile von keinem Bilderfassungssystem (sei es CCD, CMOS oder ähnlichem) mehr wegzudenken. Es zielt darauf ab, das Reset Noise, also die nach dem Reseten der Pixel übrig gebliebene Ladung (beziehungsweise Spannung) zu messen und in Folge von der belichteten Spannung zu subtrahieren. Da beide Signale denselben Weg zur Messung vollziehen, unterliegen sie auch denselben Rauschquellen, die sich somit auslöschen. Aufgrund der zweifachen Messung spricht man von Double Sampling, die einen korrelierenden Rauschanteil besitzen (deshalb correlated).

Im Ablauf würde das in etwa so aussehen:



Klar ersichtlich, dass sich im Idealfall der Resetnoise-Anteil rausrechnet und das reine Signal übrig bleibt.

Bei CMOS APS wäre es prinzipiell möglich, jeden Pixel einem CDS zu unterziehen. Zu Gunsten eines reduzierten Schaltungsaufkommen reicht es aber, nur jede Spalte zu korrigieren. Dies wiederum kann in einem so genannten Column FPN resultieren, da nicht jede CDS-Einheit gleich arbeitet und somit wieder fixe Abweichungen entstehen. Abhilfe schafft hier das Delta-Difference-Sampling (DDS), welches es durch einen kurzzeitigen Kurzschluss der Sample- & Hold-Kapazitäten und erneutem Auslesen der Signale gelingt, den Fehler zu eliminieren.<sup>59 60</sup>

<sup>59</sup> vgl. Hornsey 1999c, 142ff

<sup>60</sup> vgl. Mendis et al. 1997



Abbildung 4-2: Anhand der vertikalen Linien erkennt man das Column FPN<sup>61</sup>

#### 4.1.2. Black- und Darklines Subtraction

Gerade bei CMOS-Sensoren (Gründe hierfür wurden im 2.3 bereits diskutiert) ist es mittlerweile sehr beliebt geworden, zusätzlich zu den Ausleseverstärkern eine Extraschaltung zu implementieren, die Annahmen über das Aussehen von Rauschen direkt subtrahieren können. Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass eine möglichst genaue Vorhersage des Rauschens das A und O einer erfolgreichen Durchführung darstellt.

Und das funktioniert bei diesem Verfahren folgendermaßen:

Am Rand des Sensors sind zwei schmale Bereiche untergebracht, die praktisch nichts mit der tatsächlichen Bilderfassung zu tun haben. Stattdessen werden die so genannten Blacklines ständig mit der geringsten Belichtungsstufe beleuchtet (unabhängig von den Einstellungen) und können so das temporäre Rauschen auf einem Minimumlevel halten. Es bleibt also exklusive das FPN übrig und kann identifiziert werden. Die Darklines wiederum werden derselben Belichtung ausgesetzt wie das Bild an sich, dafür aber vom auftreffenden Licht abgeschirmt, um so die thermischen temporären Rauschfluktuationen bestmöglich einzufangen.

---

<sup>61</sup> Lim, Gamal 2002, 390

Diese Information über das Rauschen kann dann mit Hilfe komplexer Algorithmen gegen gerechnet und so beinahe eliminiert werden. In einer gewissen Weise entspricht das ebenso dem Double Sampling Konzept.<sup>63</sup>

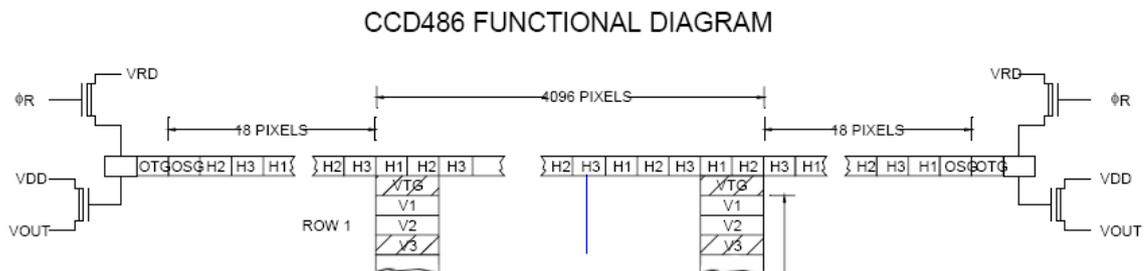


Abbildung 4-3: Links und rechts der 4096 aktiven Pixel erkennt man die 18 Pixel breiten Darklines<sup>62</sup>

### 4.1.3. Dark Field Frames

Ähnlich zu den Darklines aus dem vorigen Kapitel wird hier der Dunkelwert eines Pixels durch Abschattung der lichtempfindlichen Fläche ermittelt und anschließend subtrahiert. Allerdings wird hier nach der eigentlichen Fotografie die Aufnahme nochmals mit exakt derselben Zeit vorgenommen (aber eben mit geschlossener Blende). Diese Funktion aktiviert sich bei den meisten Kameras erst bei längeren Belichtungszeiten (ab ca. 1 Sekunde) und verlängert so auch den Aufnahmeprozess um das Doppelte. Des Weiteren bedarf es einem internen Speicher der Kamera um sämtliche Werte zwischenspeichern, bis die Dunkelladungen ermittelt wurden. Vor allem aufgrund der langen Wartezeiten wird das Verfahren der Darklines diesem häufig vorgezogen.<sup>64</sup>

### 4.1.4. LFPN CTIA APS

Hinter der als Buchstabensalat anmutenden Überschrift verbirgt sich eine Weiterentwicklung der bereits aus den 70er Jahren bekannten „Capacitive TransImpedance Amplifiers“ (CTIA) Technologie, die in CMOS-Sensoren für ein hohes Ladungs- zu Spannungsverhältnis sorgt. Nachdem dazu laut Formel 1 eine kleine Kapazität von Nöten ist, die aber fertigungstechnisch große Schwankungen aufweist, resultiert daraus ein großer Rauschfaktor, der sich letztendlich in einem Fixed Pattern Noise bemerkbar macht. Dieses FPN war auch lange Zeit der Grund für die schlechteren Rauscheigenschaften von CMOS gegenüber CCD-Chips.

<sup>62</sup> Fairchild Imaging 2004, 3

<sup>63</sup> Bosco et al. (k. A.)

<sup>64</sup> vgl. Schindler 2004, 5

Eine detaillierte Abhandlung dieses Themas würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, dennoch sei der Clou dieser Technik grob umrissen. Durch einen kapazitiven Spannungsteiler ist es möglich, die Rückkopplungs-Kapazität größer werden zu lassen (bei gleich bleibend hoher Verstärkung) und dadurch die relativen Fertigungs-Streuwerte zu verringern. Somit nähern sich die zwangsläufig unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren der einzelnen Pixel weiter an und das FPN verringert sich respektive. Wie sich zeigen lässt, funktioniert diese Methodik ohne dabei das Random Noise signifikant zu heben.

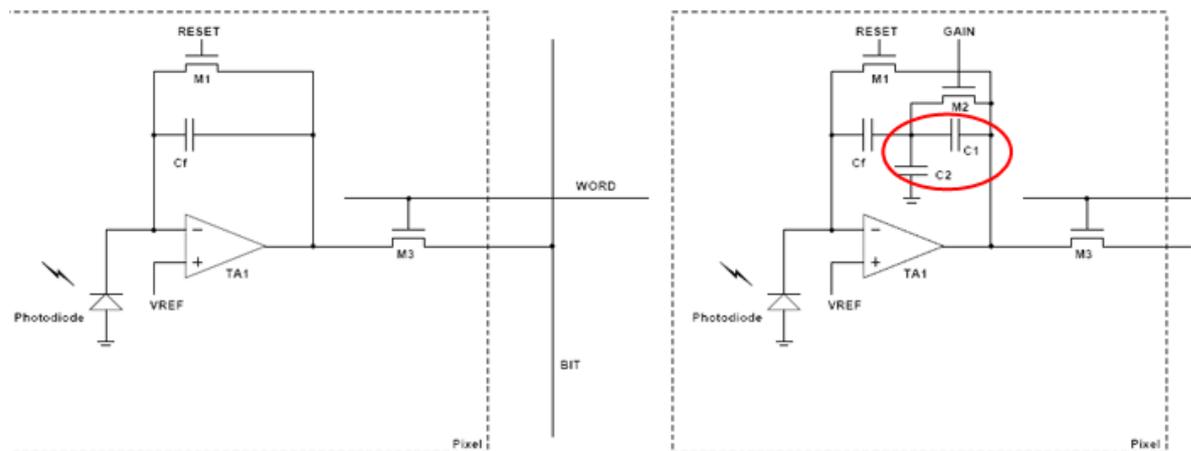


Abbildung 4-4: Normale FPN (links) und Low FPN (rechts) CTIA APS Pixel Schaltung<sup>65</sup>

Abbildung 4-4 zeigt auf der linken Seite den strukturellen Aufbau eines herkömmlichen Pixels mit einem Resettransistor M1 und der Rückkopplungskapazität Cf. Rechts daneben die selbe Schaltung um den rot markierten Spannungsteiler erweitert. Evident wird daran auch der Mehrbedarf von einem Transistor (M2) und zwei zusätzlichen Kapazitäten (C1 und C2) pro Pixel, die durch entweder einer größeren Pixelfläche oder einem geringeren Fillfaktor erkauft werden müssen. Deshalb empfiehlt der Autor dieser Abhandlung den Einsatz dieser Erweiterung bei platzunkritischen Anwendungen wie Liniensensoren (zum Beispiel Scannern) oder Stacked Sensoren wie dem Foveon X3.<sup>66</sup> (siehe auch Kapitel 2.5 – Foveon X3 Chip)

<sup>65</sup> Fowler et al. (k. A. a)

<sup>66</sup> vgl. ebd.

#### 4.1.5. Active Reset for CMOS APS

Während temporäres Rauschen bei CCD mittels Correlated Double Sampling (CDS) weitgehend in den Griff bekommen wurde, ist man bei CMOS APS aufgrund der Platzlimitierungen bisher an die Grenzen des möglichen Rauschabstandes gestoßen. Vor allem das Reset Noise (siehe 3.1.7) stellte hier eine strikte Limitierung in Form von  $kT/C$  (siehe Formel 3) dar.

Eine weitere Arbeit von Fowler et al. der Pixel Devices International Inc. zeigt aber, dass durch ein komplexes Zusammenspiel mehrerer zusätzlicher (im Beispiel konkret dreier) Transistoren dieses Verhältnis auf einen beachtlichen Faktor von  $kT/18C$  gedrückt werden kann. Allerdings ohne dabei das so genannte Lag, welche die verbleibende Ladung nach dem Reset darstellt, merklich ansteigen zu lassen (gemessene 0,02% der gesamt möglichen Ladung). Einziger Wehrmutstropfen der Angelegenheit ist die bereits erwähnte gestiegene Anzahl an Transistorlogik und die damit verbundenen Nachteile des erhöhten Strom- und Zeitbedarfs.<sup>67</sup>

#### 4.1.6. Multiple Reads During Integration (MRDI)

Mit dieser Technologie (ebenfalls aus der Feder von Boyd Fowler) gelingt es durch mehrfaches Auslesen eines Bildsensors die Dynamik mit einem Faktor von  $n^{3/2}$  zu erhöhen. Diese Technik existiert schon des längeren in Infrarot-Teleskopen, die naturgemäß mit schwachen Signalen und damit verbundenen starken Rauschen zu kämpfen haben.

Leider funktioniert diese Idee nicht mit allen Chips, denn die Forderung, dass sich die Ladung während der Integrationszeit mehrfach nicht-destruktiv auslesen lässt (daher auch der Name) erfüllt nicht jeder Sensor. So auch kein CCD, der seine gebündelte Ladung ja von einem Pixel zum nächsten übertragen muss und so erst am Ende des Sammelprozesses am Ausgang verfügbar ist. Diese Technik ist auch ein gutes Beispiel dafür, dass es zwar direkt am Chip stattfindet, dennoch eine ausgeklügelte Software erfordert, die statistische Wahrscheinlichkeiten der (mehrfach) ausgelesenen Signale in Echtzeit kombiniert und analysiert.<sup>68</sup>

---

<sup>67</sup> vgl. Fowler et al. (k. A. b)

<sup>68</sup> vgl. Fowler 2002

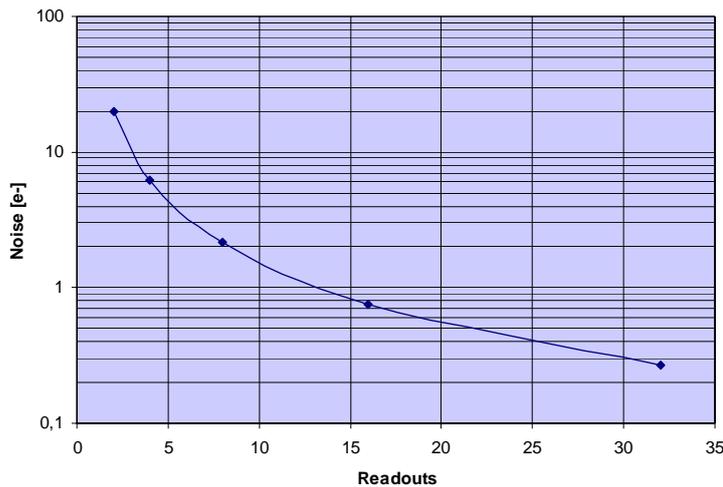


Diagramm 4-1: Das Ausleserauschen nimmt bei MRDI reziprok zu  $n^{3/2}$  ab

#### 4.1.7. Linear Current Mode Imager

Herkömmliche CMOS-Bausteine werden im Voltage Mode betrieben, was bedeutet, dass der Output eines Elements in Form von Spannung weiterverarbeitet wird. Allerdings gibt es Gründe wie eine höhere mögliche Auslesegeschwindigkeit oder einfacher zu realisierende analoge Schaltungselemente, die dafür sprechen, dieses Ausgangssignal in Form von Strom zu verarbeiten. Gerade die Einfachheit der Schaltungselemente, mit deren Hilfe Vorgänge wie Faltung (siehe 4.2), Kompression und dergleichen schneller und genauer realisiert werden können, sprechen für die Verwendung des Current Modes. Doch just bei der Bilderfassung hat dieser Modus seine Probleme, denn dabei entsteht durch Nicht-Linearitäten ein rohes Rauschmaß (FPN) und somit eine geringe Auflösung, die in späterer Folge nicht wieder wettgemacht werden kann.

Genau hier setzt das Schaltungsdesign von Gruev, Etienne-Cummings und Horiuchi an, die es in einer Gemeinschaftsarbeit der Universitäten von Baltimore und Maryland geschafft haben, mittels einem im „Triode Mode“ operierenden „Transimpedance Amplifier“, die Photodiодenspannung weitgehend linear in einem Stromwert umzuwandeln. Durch eine angepasste CDS-Einheit ist es somit möglich, das FPN von knapp 2 % der Sättigung auf 0,8 % zu drücken. Abbildung 4-5 zeigt die beachtlichen Auswirkungen auf ein reales Bild.<sup>70</sup>



Abbildung 4-5: mit (links) und ohne CDS (rechts)<sup>69</sup>

<sup>69</sup> ebd., 862

<sup>70</sup> vgl. Gruev, Etienne-Cummings, Horiuchi 2004

#### 4.1.8. Pseudo Active Pixel Structure (PAPS)

Im Gegensatz zu den hier bereits gelisteten Verfahren zur Rauschverminderung ist die hier vorgestellte Technologie keine Neuentwicklung, sondern eine strikte Weiterführung des bekannten APS-Systems. Es wird also kein zusätzlicher Mechanismus verwendet um entstandenes Rauschen zu mindern, sondern es wird viel mehr eine geänderte Struktur angestrebt, die es in Kombination mit einer neuartigen Ausleseschaltung möglich macht, ein weit höheres SNR zu gewährleisten. Dies gelingt durch einen niedrigeren Dunkelstrom und verringerten Shot Noise, als es bei herkömmlichen APS je möglich wäre. Vor allem der Dunkelstrom, der normalerweise von den Photodioden rührt, die durch Schwankungen mit verschiedenen Vorspannungen belastet sind, wird durch Nullsetzung eben dieser Spannung beinahe eliminiert. Ein Teil der bei aktiven Schaltungen benötigten Schaltkreise werden außerhalb des Pixels eingesetzt, weshalb das Design mehr dem des PPS entspricht. Somit kann auch eine kleine Pixelgröße und trotzdem ein hoher Füllfaktor von beinahe 60% erreicht werden. Der Ausleseprozess (die Bezeichnung ZCB DI – Zero-Bias Column Buffer Direct Injection deutet auf die Komplexität hin) verläuft im 4.1.7 beschriebenen Current Mode und macht die herausragende Performance dieser Technologie erst möglich. Im Labor wurde bereits zu Testzwecken ein 352 x 288 Pixel großer Chip entwickelt und liefert die in Tabelle 4-1 aufgezeigten beeindruckenden Werte.

Pixel Structure	PAPS	APS
Technology	0,25 $\mu\text{m}$ CMOS	0,35 $\mu\text{m}$ CMOS
Linearity	92%	80%
Dark Current	93 pA/cm <sup>2</sup> (room)	370 pA/cm <sup>2</sup> (room)
Sensitivity	0,16 V/lux.s	0,52 V/lux.s
Optical Dynamic Range	72 dB	53 dB
FPN	5,3 mV	8–24 mV
Pixel Size	5,8 x 5,8 $\mu\text{m}$	7,4 x 7,4 $\mu\text{m}$
Fill Factor	58%	25–47 %
Power Dissipation	24 mW	31 mW

**Tabelle 4-1: PAPS im Vergleich zu herkömmlichen APS**

Lediglich die reduzierte Empfindlichkeit kann mit der des APS nicht mithalten, die aber rein von der verkleinerten Pixelfläche her rührt und aufgrund des dennoch hohen Dynamikumfangs keinen Nachteil darstellt.

Die Aktualität der Arbeit (November 2004) lässt auf hohes Entwicklungspotential schließen und die ersten serienreifen Kameramodelle der Hersteller werden Aufschluss darüber geben, ob die Zeiten der CCD-Vorherrschaft endgültig gezählt sind.<sup>71</sup>

<sup>71</sup> vgl. Shih, Wu 2004

#### 4.1.9. Weitere Korrekturmethode

- Autozeroing (AZ) ist verwandt zum CDS, dient aber eher dazu, den notwendigen Verstärker, der die kleinen Eingangssignale aus dem Pixel in verwertbare Ausgangssignale umwandelt, offsetfrei zu halten. Dies ist notwendig, da Verstärkeroffsets zu einem unterschiedlichen Verstärkerverhalten führen und somit in einem Patternrauschen enden. Erreicht wird dies durch Speicherung des Ausgangs bei kurzgeschlossenem Eingang (= Signal 0) und anschließendem subtrahieren des tatsächlichen Ausgangssignals. Im einfachsten Fall lässt sich dies durch einen Transistor (fungierend als Schalter), einer Kapazität und einem Widerstand (zur Speicherung) realisieren, wurde aber mittlerweile durch exaktere und umfangreichere Korrekturmethode abgelöst.
- Chopper Stabilization (CHS) geht im Vergleich zu den meisten bisher vorgestellten Methoden einen anderen Weg der Korrektur. Wurden bislang oft die (unterschiedlich erhaltenen) Werte gesampelt und anschließend subtrahiert, so wird bei CHS zunächst das gesamte Signal durch Modulation in ein höheres Spektrum transformiert. Die nun folgende Verstärkung kann ohne Einfluss des niederfrequenten Rauschens (vor allem das  $1/f$  Rauschen) erfolgen, das somit nach Rücktransformation in das Basisband quasi unangetastet (= unverstärkt) blieb.

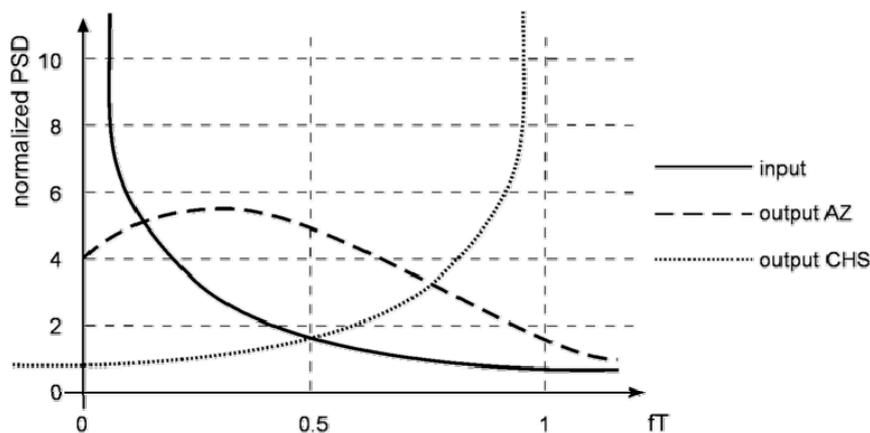


Diagramm 4-2: Vergleich von AZ und CHS anhand einer vereinfachten PSD

Diagramm 4-2 zeigt anhand einer vereinfachten Power Spectral Density (PSD) das Übertragungsverhalten von Autozeroing und Chopper Stabilization im Vergleich. Die niederfrequenten Anteile (inklusive Offset) des Eingangssignals werden in beiden Fällen ausgezeichnet unterdrückt, allerdings zeichnet sich CHS bei höheren Frequenzen durch eine bessere Übertragung aus. Gründe hierfür finden sich in der angeführten Literatur.<sup>72</sup>

<sup>72</sup> Enz, Temes 1996

## 4.2. Software Maßnahmen (mathematische Theorie)

Dieses Kapitel stellt mit seinen mathematischen und statistischen Grundlagen quasi den Konnex zwischen dem vorigen hardwarenahen Methoden und den Softwarelösungen des nachfolgenden Kapitels dar. Während bei den auf Chipebene eingesetzten Verfahren bereits zum Teil Ansätze der im Folgenden beschriebenen Algorithmen verwendet wurden, so stützen sich die im Kapitel 5 beschriebenen Programme beinahe exklusiv auf genau solche mathematische Ansätze.

Aus diesem Grund soll auch diese „graue“ Theorie durchaus breiter beleuchtet werden, denn sie ist das Werkzeug, mit dem es möglich ist, bereits aufgezeichnetes Rauschen wieder einigermaßen in den Griff zu bekommen.

Prinzipiell unterscheidet man in der Literatur zwischen „Image Enhancement“ und „Image Restoration“. Wobei ersteres bedeutet, das Bild durch Histogrammverschiebungen, Gradiationskurven und Kontrastbeeinflussung für den Betrachter konformer zu gestalten. Dieser Betrachter kann auch eine vollautomatische Kamera sein, die anhand eines 1-Bit-Bildes (nur Weiß- und Schwarzwerte) Formen, Lagen und Geschwindigkeiten erkennen kann. „Image Restoration“ geht gezielt von einem degradierten Bild aus, das durch erkennen des Degradierungsmodells und einem inversen anwenden dessen, das Originalbild wieder erlangen will. Die Ursachen dieser Verfremdung können vielfältig sein<sup>73</sup>:

- Unschärfe durch atmosphärische Turbulenzen
- geometrische Verzerrungen durch nicht ideale Linsen
- überlagerte Partikel wie Staub
- Rauschen vom elektronischen Ablichtungsprozess.

Leider kennt man in der Praxis die genaue Degradierungs-Funktion nur selten, oder noch schlimmer, es ist eine Überlagerung mehrerer der oben genannten in einem unbekanntem Verhältnis. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Beschränkung exklusive auf das Rauschverhalten getroffen und so kann davon ausgegangen werden, dass alleinig Rauschen für die Verfremdung verantwortlich ist.

Trotz dieser vereinfachenden Annahme ist es nach wie vor äußerst schwierig eine exakte Nachbildung des Rauschens zu erzielen, welche aber die Grundlage für eine optimale Verminderung darstellt.

---

<sup>73</sup> vgl. Umbaugh 2005a, 3

Zur Illustration kann man sich den Prozess der Image Restoration ungefähr so vorstellen:

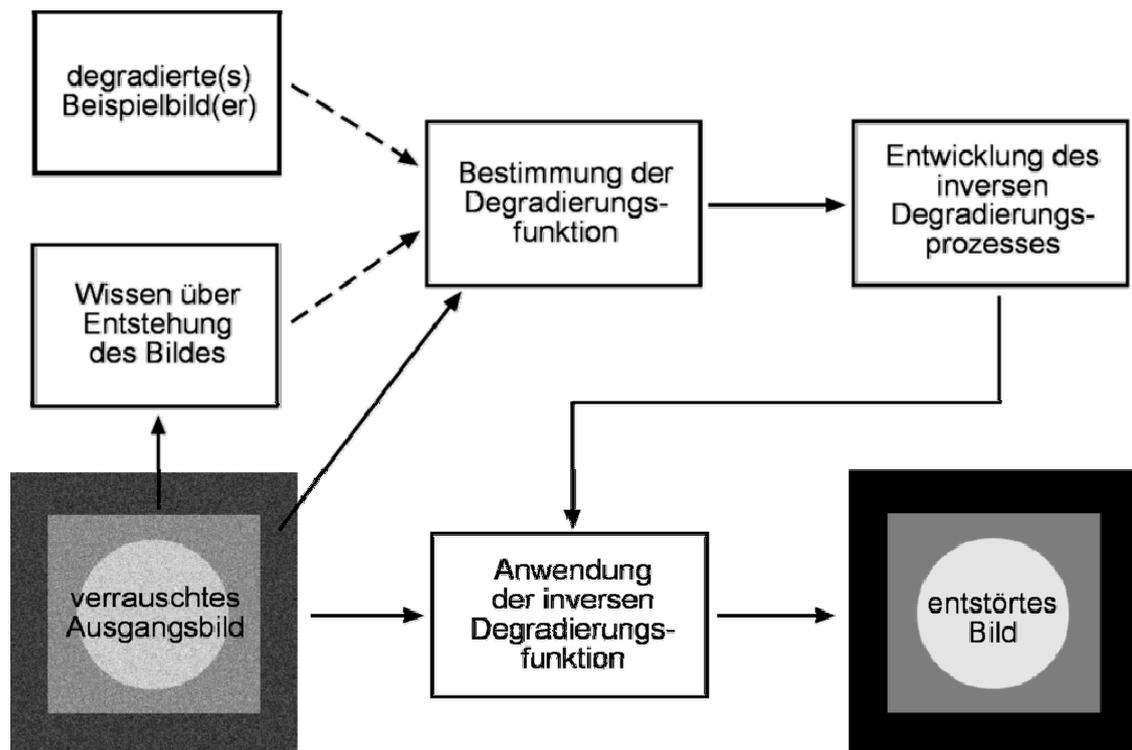


Abbildung 4-6: prinzipieller Prozess der Image Restoration<sup>74</sup>

In der Mathematik spricht man im Ortsraum formal von<sup>75</sup>

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + \eta(x, y) \quad (6)$$

$g(x,y)$  = degradiertes Bild

$h(x,y)$  = Degradierungsfunktion

$f(x,y)$  = Originalbild

$\eta(x,y)$  = Rauschfunktion

wobei \* eine Faltung repräsentiert

Da aber in dem behandelten Fall das Bild ausschließlich vom Rauschen beeinträchtigt wird, ist  $h(x,y) = 0$  zu setzen und so folgt

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y) \quad (7)$$

beziehungsweise für den Frequenzraum (nach einer Fourier-Transformation)

$$G(u, v) = F(u, v) + N(u, v) \quad (8)$$

<sup>74</sup> vgl. Umbaugh 2005, 5

<sup>75</sup> vgl. Gonzalez, Woods 2002, 230

### Exkurs: Filterung im Orts- und Frequenzraum

Bei einer Filterung im Ortsraum werden Pixel in Abhängigkeit ihrer Position zum Zentrum des Betrachtungsfensters (Window/Filtermaske) manipuliert. Dies entspricht dem logischen Verständnis einer zweidimensionalen Leinwand, deren Oberfläche Stück für Stück abgeändert wird. Wird hingegen ein Bild im Frequenzbereich verändert, so muss zunächst eine Transformation (zum Beispiel eine diskrete Fourier-Transformation) erfolgen, die die Werte des Bildes in Frequenzen umlegt. Jetzt kann die eigentliche Manipulation durchgeführt werden, indem man zum Beispiel hohe Frequenzanteile unterdrückt. Danach ist noch eine Rücktransformation in den Bildbereich ausständig um das manipulierte Bild wieder darstellbar zu machen (Invertierbarkeit der Fourier-Transformation). Filterungen sind zumeist im Frequenzbereich mit weniger Aufwand verbunden, allerdings bedarf die Transformation (Hin- und Rücktransformation) auch eine gewisse Zeit, die sich erst bei größeren Filtermasken durch einen sinkenden Aufwand bemerkbar macht.<sup>76</sup>

Frequenzraumfilter sind vor allem dann hilfreich, wenn periodisch auftretendes Rauschen (wie zum Beispiel hervorgerufen durch Interferenzen bei Übertragungsstrecken) gezielt unterdrückt werden soll.

Bei der hier vorgenommenen Untersuchung beschränken wir uns auf den Ortsraum (periodisches Rauschen ist eher die Ausnahme), den wir mittels örtlicher Faltung (Spatial Convolution) nach verschiedenen Grundsätzen bearbeiten.

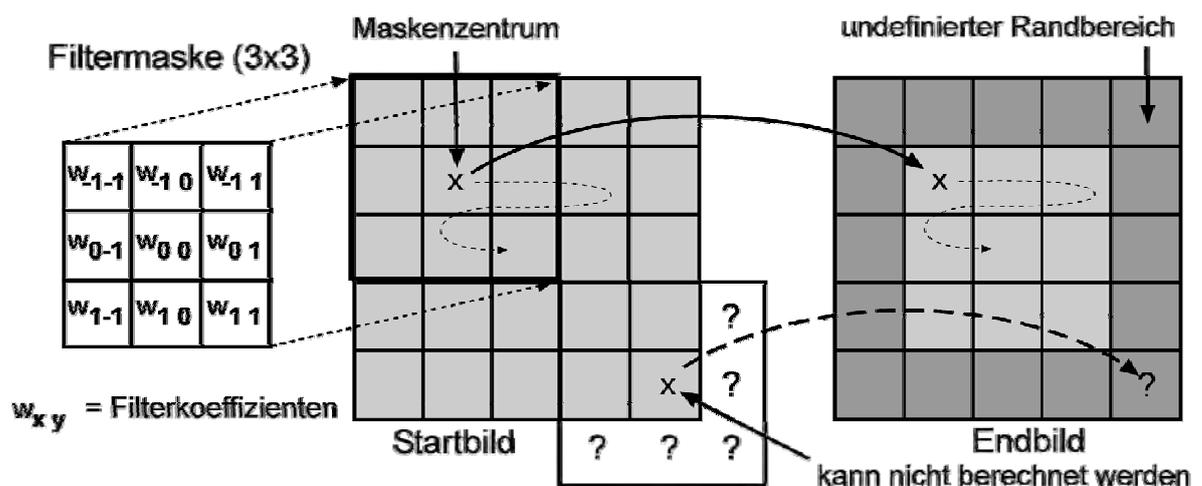


Abbildung 4-7: örtliche Faltung mit einer 3x3 Filtermaske

<sup>76</sup> vgl. Zielke 2000, 6a.2

Dazu berechnet sich jeder Pixel der Koordinate  $x, y$  (da wir uns im Ortsraum bewegen) des Endbildes als gewichtete Summe der umgebenen Pixel. Als Gewichte werden dazu die Koeffizienten einer Filtermaske (Subimage) herangezogen, die gemäß einer Vorschrift definiert werden. Um nur Akzente, nicht aber den ganzen Bildbereich zu verändern, muss die Summe aller Koeffizienten 1 ergeben. Dazu ist ein Normalisierungsmultiplikator notwendig, der dem Prozess meist voran gestellt ist und sich aus dem Reziprokwert der Summe der Koeffizienten bildet. In Abbildung 4-7 zeigt sich die Filtermaske, die mit ihren 9 Koeffizienten ( $w_{-1-1}$  bis  $w_{1-1}$ ) das Ausgangsbild in der Form von

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x+s, y+t)$$

$$a = (m-1)/2$$

$$b = (n-1)/2$$
(9)

**m,n = Größe der Filtermaske**

**x,y = aktuelle Position der Manipulation**

erwirken<sup>77</sup>. Wobei es zu beachten gilt, dass die Manipulation mit dem Filterkern an einer Position auch nur an der korrespondierenden Position einen Ausgangswert liefert. Um das ganze Bild zu filtern, wird die Maske sukzessive weiter gerückt. Die daraus entstehenden Ränder, die in der Größe von  $(m,n-1)/2$  übrig bleiben, werden unterschiedlichsten Nachbearbeitungen unterzogen (von 0 setzen bis Interpolation), auf die aber im Zuge dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird (= Randproblem). Durch diesen aus der Frequenzdomäne stammenden Ansatzes der Faltung, lassen sich im Ortsraum zum Beispiel Tiefpass- oder Gauß'sche Filter realisieren. Im Folgenden seien Beispiele solcher Filtermasken angeführt, die, wie sich später zeigen wird, hervorragend zur Rauschfilterung geeignet sind.

$$a) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad b) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad c) \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 1 & 4 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad d) \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

**a & b: Beispiele für eine arithm. Mittelwertfilter, c & d: Annäherungen an einen Gauß'schen Filter<sup>78</sup>**

**(Anm.: Der Normmultiplikator wurde zu Gunsten einer besseren Ersichtlichkeit weggelassen)**

Da  $N(u, v)$  aus Gleichung 8 zumeist (außer bei periodischem Rauschen) eine unbekannte Variable darstellt, kann sie auch nicht einfach subtrahiert werden. Bei dem vorliegendem Phänomen bleibt lediglich die örtliche Filterung die einzig mögliche Wahl der Mittel.

<sup>77</sup> vgl. Gonzalez, Woods 2002, 118

<sup>78</sup> vgl. Umbaugh 2005, 42

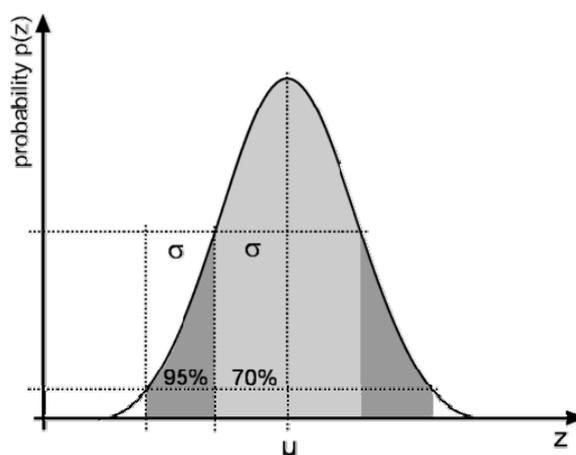
Doch zunächst gilt es die verschiedenen auftretenden Arten des Rauschens zu analysieren, um dann mit geeigneten Mitteln gegen sie vorgehen zu können.

#### 4.2.1. Rauscharten

In der Mathematik wird wie die meisten zufällig auftretenden Ereignisse Rauschen hauptsächlich über deren Auftretswahrscheinlichkeiten definiert. Diese Funktion als abhängige des Grauwertes des Rauschens wird auch als Probability Distribution Function (PDF) oder auch einfach nur als Histogramm bezeichnet. Mathematisch werden die Rauscharten auch nach deren Kurvenverlauf (zum Beispiel Gauss) benannt. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit wird auf zwei grundlegende Modelle gerichtet, die am besten geeignet sind, die im Aufnahmeprozess auftretenden Rauscharten zu simulieren. Zur besseren Anschaulichkeit wird in der Literatur meist das Rauschen auf Grauwerte reduziert, ansonsten würde sich die Annahmen aber einfach nur für jeden Farbkanal (Rot, Grün, Blau) erweitern.

- **Gaussian Noise (Normal Noise)**

Das Gaußsche Rauschen (benannt nach Carl Friedrich Gauß) stellt mit ihrer Verteilung das bei natürlichen Rauschprozessen – wie es bei den hier angewendeten Betrachtungen der Fall ist – am häufigsten benutzte Fehlermodell dar. So entsprechen Schaltungs- und Sensorrauschen, bei hohen Temperaturen oder niedriger Beleuchtungsstärke sehr exakt den Verteilungen einer Gauß'schen Glockenform.



$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(z-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (10)$$

$z$  = Grauwert

$\mu$  = Mittelwert (mean)

$\sigma$  = Standardabweichung (standard deviation)

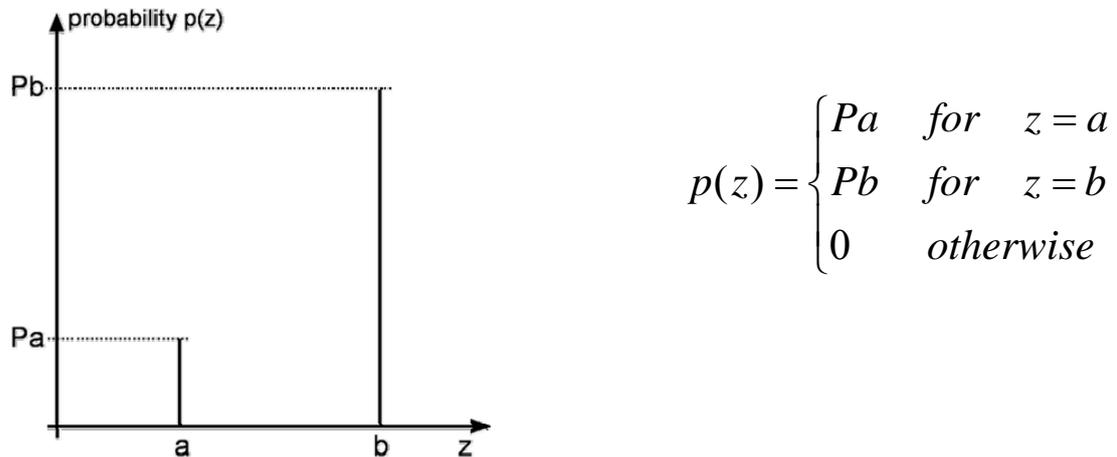
$\sigma^2$  = Varianz (variance)

Diagramm 4-3: Gauß'sche PDF

Charakteristisch für diesen Kurvenverlauf ist, dass rund um den Graumittelwert  $\mu$  die Auftretswahrscheinlichkeiten sehr stark abnehmen. So finden sich im Bereich von  $(\mu-\sigma)$  bis  $(\mu+\sigma)$  bereits 70 % aller Rauschvariationen (hellgraue Fläche). Nochmals erweitert um die Standardabweichung  $\sigma$  deckt die Kurve volle 95 % aller auftretenden Grauwerte ab.

- **Salt and Pepper Noise (Impulsrauschen, Shot Noise, Spike Noise)**

Dieses Rauschen kennt, wie der Name schon sagt, lediglich zwei Zustände: Vollausschlag (Salt) und kein Ausschlag (Pepper). Ein Vergleich mit Kapitel 3.1 (Rauscharten) zeigt, dass dies exakt dem Hot Pixeling entspricht, denn die Fehlfunktionen der Pixel erzeugen genau diese Signallevel.



**Diagramm 4-4: PDF eines Salt-n-Pepper Rauschens**

Im Konkreten würde das für ein 8 Bit Bild bedeuten, dass  $a=0$  für Schwarz und  $b=255$  für Weiß zu setzen wäre.

Des Weiteren gibt es noch eine Vielzahl anderer Rauscharten (Rayleigh, Gamma, Exponential und Uniform), die aber für die hier behandelten Umstände keine Relevanz haben.

Anmerkung: Sämtliche im Folgenden vorgenommenen Bilddegradierungen und Analysen wurden mit Hilfe des Programms CVIPTools 3.9 durchgeführt. Dieses unter der Leitung von Dr. Scott Umbaugh an der Southern Illinois University in Edwardsville entwickelte Programm steht zum kostenlosen Download auf deren Website zur Verfügung.<sup>79</sup>

<sup>79</sup> <http://www.ee.siu.edu/~cvip/> (03. 06. 2005)

#### 4.2.2. Analysemethoden

Anhand eines einfachen Testbildes soll nun das oben Erwähnte illustriert werden. Dientlich dafür erweisen sich Histogramme, die ähnlich zu einer PDF den Anteil an Grauwerten in Form von vertikalen Linien signalisieren.

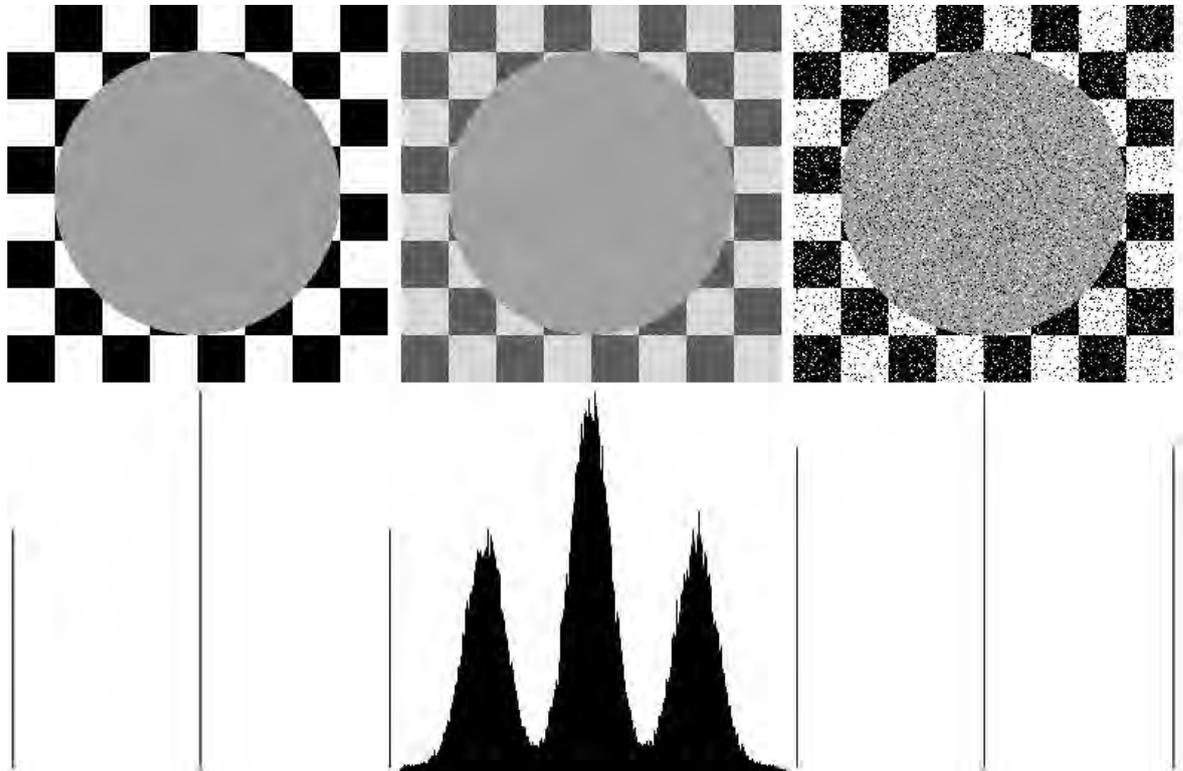


Abbildung 4-8: Original (links), Gauß'sches Rauschen (Mitte) und Salt'n'Pepper-Rauschen (rechts)

Die senkrechten Striche im Histogramm des 8-Bit Graustufenbildes (das heißt jeder Pixel nimmt *einen* Wert von 0 bis 255 ein) in Abbildung 4-8 (links) zeigen die drei exklusiv vertretenen Werte 0, 128 und 255.

Anteilmäßig ist das Grau des Kreises im Bild um etwa ein Drittel dominanter als Schwarz und Weiß (erkennbar durch die Länge der einzelnen Striche). Durch das Hinzufügen von Impulsrauschen (rechts) mit einer Wahrscheinlichkeit von  $P_a = P_b = 0,8$  gleichmäßig über das Bild hinweg, sinkt dieser Überhang, da das 128er Grau additiv von den Störungen überlagert wird und so die Striche links und rechts (0 und 255) vergrößert werden. Das Rauschen in der Mitte entspricht einem Gauß'schen Rauschen mit einer *variance* von 600 und einem *mean* von 0. Aus dem Histogramm in der Mitte ist die Glockenform aus Diagramm 4-3 klar ersichtlich, die sich über jeden Spike des Originalbildes legt.

So unterschiedlich die Rauscharten auch wirken mögen, gemein haben (fast) alle aber, dass sie über das gesamte Frequenzspektrum hinweg gleich verteilte Energieanteile halten (Weißes Rauschen), wohingegen ein durchschnittliches Bild die meiste Energie in den hohen Frequenzen besitzt (Detailreichtum). In der rechten Abbildung ist diese Verlagerung anhand der Fourier-Spektren unterhalb der Bilder gut ersichtlich. Wobei helle Partien hohe energetische Levels symbolisieren und die Frequenz mit der Entfernung vom Mittelpunkt ansteigt.

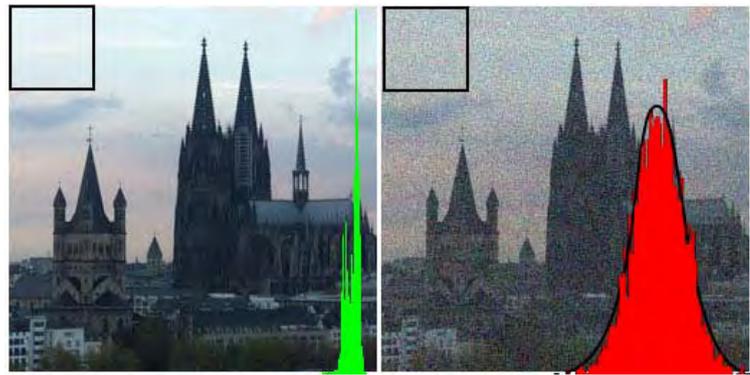


Diese Annahme lässt also den Schluss zu, dass sehr viel der auftretenden hohen Frequenzen auf Rauschen zurückzuführen ist und somit mittels eines Tiefpassfilters eliminierbar ist.

Um jetzt aber die Reduktionsmethode gezielt auf die tatsächlich auftretende Art und das Ausmaß des Rauschens abstimmen zu können, ist es notwendig das Bild zu analysieren und das eventuelle Rauschen zu charakterisieren. Dies funktioniert am besten, wenn Bildinhalte existieren, die entweder exklusiv Rauschen enthalten oder (was seltener der Fall ist) exaktes Wissen über das Histogramm des Bildes vorhanden ist. Ersteres lässt sich entweder durch Fotografieren einer einfarbigen Fläche oder durch Selektieren eines (ausreichend großen) Teilbereichs des Bildes, der keine bis kaum Details beinhaltet, erreichen. Neben dem reduzierten Arbeitsaufwand bei der Methode des Teilbereichs hat es auch den Vorteil, dass die Umgebungsbedingungen (Belichtung und dergleichen) und somit auch das Rauschen definitiv dem des Bildes entsprechen. Bei den im (Teil-)bild auftretenden Fluktuation kann dann davon ausgegangen werden, dass es sich um exklusives Rauschen handelt. Im Histogramm macht sich dieser Umstand ähnlich wie in Abbildung 4-8 gezeigt in Form eines eindeutigen Kurvenverlaufs rund um eine idealisierte Spitze (= der monotone Grauwert der Szene) bemerkbar. Dies wäre mit der Analyse des gesamten (gestörten) Bildes nicht möglich, da die Details des Bildes im Histogramm keinen eindeutigen Schluss über die Rauschcharakteristika zulassen würden.

**Abbildung 4-9: Fourierspektrum (jeweils unterhalb) des Original- (links) und des Gauß-verrauschten Bildes (rechts)**

Rechtsseitige Abbildung illustriert mittels gestreckter Histogramme die Identifizierbarkeit des Gauß'schen Rauschens. Die Ähnlichkeit zur überlagerten Glockenkurve auf der rechten Seite ist nicht von der Hand zu weisen. Ebenso würden sich jetzt der Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  ableiten lassen.<sup>80</sup>



**Abbildung 4-10: Detailarmes Subimage zur Rauschbestimmung**<sup>80</sup>

### 4.2.3. digitale Filter

Mit dem soeben gewonnen Wissen lässt sich nun ein örtlicher Filter (Spatial Filter) kreieren, der die Abweichungen der einzelnen Pixel bestmöglich auszugleichen vermag. Es wird ähnlich zur frequenzmäßigen Faltung ein weiter wanderndes Teilbild mit Koeffizienten bewertet, bzw. bearbeitet, weshalb man auch von einer Faltungsmaske (convolution mask) spricht<sup>81</sup>. Prinzipiell betrachten alle Filter einen Ausschnitt des Bildes und bewerten die Pixel darin nach bestimmten Kriterien (vgl. Abbildung 4-7), dennoch lassen sich bezüglich deren Vorgehensweisen drei Kategorien unterteilen<sup>82</sup>:

- **Order Filter** Die Pixel werden, wie der Name schon sagt, aufsteigend geordnet, und nach einem speziellem Kriterium der „richtige“ Wert ausgewählt. Er ist vor allem für Impulsrauschen und um Bilder zu glätten (*smooth*) geeignet. Es werden keine neuen Werte erzeugt, weshalb auch kein Verschleifen der Kanten hervorgerufen wird.<sup>83</sup>
- **Mean Filter** Hier wird ein Durchschnittswert der untersuchten Pixel errechnet und ist am besten für Gauß'sches Rauschen geeignet. Nachteilig ist, dass durch Einführung eines vorher nicht existenten Wertes (Durchschnittswert) das Bild unnötig weich gezeichnet wird.
- **Adaptive Filter** Diese Gattung von Filtern ist in der Lage, sein Verhalten aufgrund von Kontrast und Helligkeitswerte des Bild (-ausschnitts) zu ändern, um ein möglichst optimales Verhältnis von Rauschunterdrückung und Detailerhalt zu erreichen. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand der Berechnung.

<sup>80</sup> vgl. Umbaugh 2005, 32

<sup>81</sup> vgl. Gonzales, Woods 2002, 117f

<sup>82</sup> vgl. Umbaugh 2005, 33f

<sup>83</sup> vgl. Zielke 2000, 7.19

### 4.2.3.1. Order Filter (non-linear)

Aus dem Untersuchungsfeld werden die Pixelwerte nach deren Helligkeiten (Grauwerte) ausgelesen und aufsteigend sortiert.

Definiert wird  $N$  als Pixelseitenlänge des Teilbildes (Window, Subimage), die um ein Zentrum zu erlangen ungerade sein muss (aus Trivialitätsgründen wird  $N=1$  nicht behandelt). Da der bearbeitete Pixel mitberücksichtigt wird, erhalten wir also  $N^2$ -Werte, die wir als  $\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_{N^2}\}$  bezeichnen. Bei der anschließenden Reihung wird folgende Regel beachtet:  $\{I_1 \leq I_2 \leq I_3 \leq \dots \leq I_{N^2}\}$ .

Beispielgebend soll ein  $3 \times 3$  ( $N=3$ ) Pixel großes Subimage behandelt werden, dessen

örtliche Anordnung etwa so aussehen könnte.  $\begin{bmatrix} 128 & 133 & 128 \\ 90 & 100 & 110 \\ 90 & 85 & 85 \end{bmatrix}$  Dies würde folgende Reihung

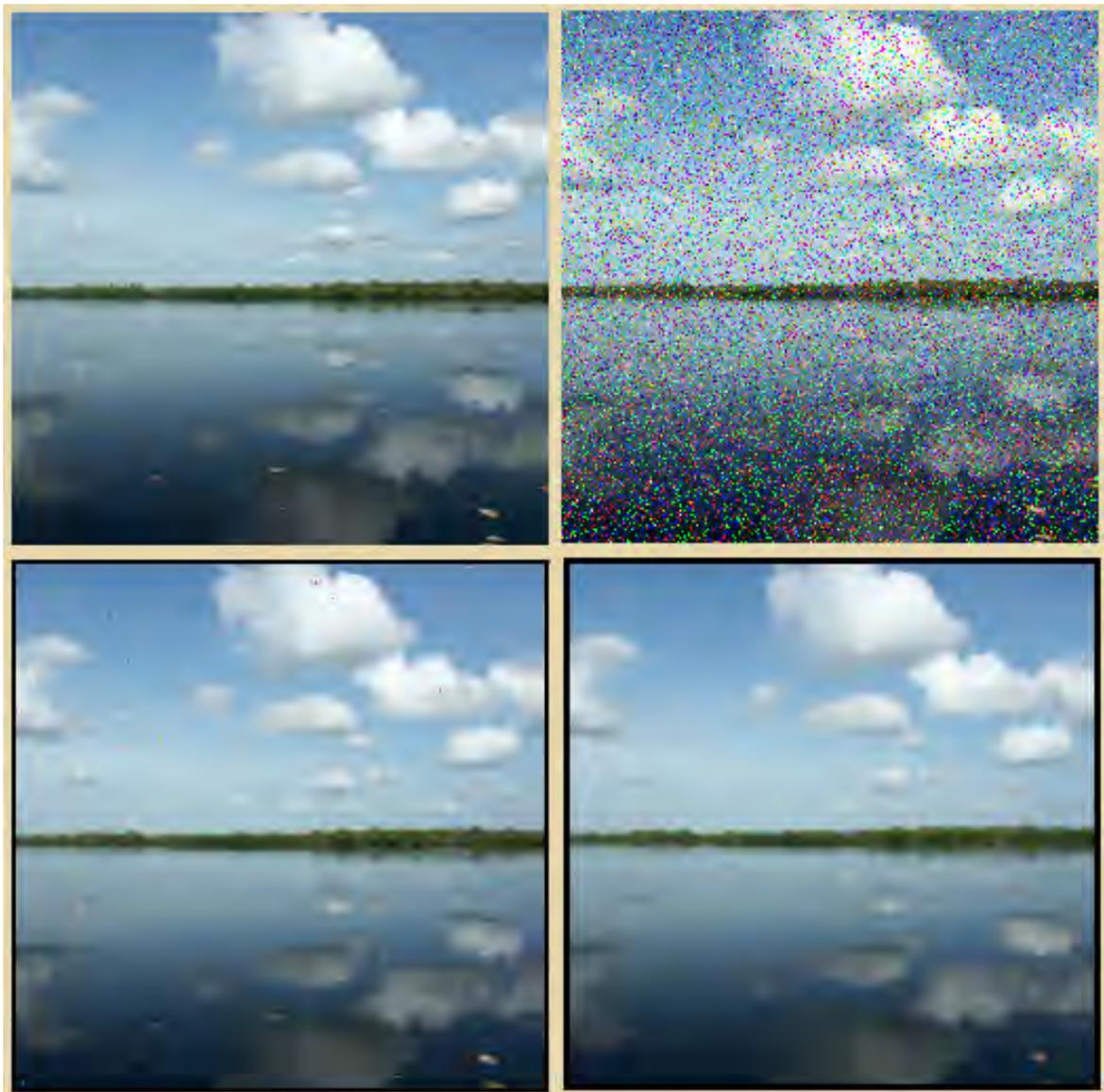
ergeben  $\{85, 85, 90, 90, 100, 110, 128, 128, 133\}$ , wobei jeder  $I_x$ -Wert einen Rang (engl. rank) erhält. Nun wird ein bestimmter Wert (je nach Filterart) daraus ausgewählt und anstatt den einen Pixels an der Stelle  $x, y$  verwendet.

- **Median-Filter**

Der Median-Filter ist der gebräuchlichste unter den Ordnungsfilttern, da er bei Impulsrauschen die besten Ergebnisse liefert, ohne das Bild unnötig weich zu zeichnen. Wie der Name schon verrät, wird der Wert mit dem mittleren Rang ausgewählt. In dem Beispiel von oben wäre das der Wert mit dem Rang  $(N^2-1)/2$  ( $=5$ ), also 100. Die Natur dieses Filters liegt darin, einzelne Punkte eines Clusters mehr deren Nachbarn zu entsprechen (innerhalb des Subimages). Dennoch werden zum Beispiel dunkle Flächen, die kleiner sind als die Hälfte des Teilbildes ( $N^2/2$ ) eliminiert<sup>84</sup>. Hier würde beispielsweise ein Average-Filter (siehe Kapitel 4.2.3.2) ein durchschnittliches Grau liefern, was im Vergleich dazu das Bild weniger stören würde. So spricht das White Paper von nik multimedia, inc. auch davon, dass ein Median-Filter bei zu großem Effektradius Details zu sehr in einen Wasserfarben-Look verwandelt, der noch störender sein kann, als das eigentliche Rauschen.

---

<sup>84</sup> vgl. Gonzales, Woods 2002, 124



**Abbildung 4-11: Originalbild, Impulsverrauscht ( $P_a=P_b=0.8$ ), Medianfilter (3x3), Medianfilter (5x5) (links oben, rechts oben, links unten, rechts unten)**

Am Beispiel der obigen Abbildung erkennt man die ausgezeichnete Leistung, die ein solcher Filter zu vollbringen vermag. Das ausschließlich (!!!) mit Impulsrauschen gestörte Originalbild kann beinahe vollständig wieder hergestellt werden. Lediglich kleinere so genannte „remaindered pixels“ bleiben zurück, die zufällig in dem neun Pixel großen Subimage genau dem mittleren Rang entsprochen haben. Um diese auch noch zu beseitigen, ist es erforderlich den Radius auszuweiten (Bild rechts unten). Zwar ist dies vom sämtlichen überlagerten Rauschen bereinigt, dafür entsteht der oben besprochene Wasserfarben-Effekt („painted effect“), der das Bild nicht mehr so erscheinen lässt, wie es

ursprünglich entstanden ist. Aber selbst bei dem kleineren, 3x3 großen Effektradius, ist im detailreichen Baumgürtel in der Mitte des Bildes ein Detailverlust zu erkennen.

Abbildung 4-12 belegt das eben diskutierte dadurch, dass das N=3 gefilterte Bild (grün) eher dem Originalbild (weiß) entspricht, als das mit N=5 (rot). Abgeschlagen ist das verrauschte Bild mit dem blau eingefärbten Histogramm, welches aber immer noch die Originalform erkennen lässt.

(Anmerkung: Das Histogramm entspricht einem Luminanz konstant konvertierten Graubild des Originals, deshalb nur eines statt der drei Bänder für die Rot-, Grün- und Blauanteile).

Des Weiteren ist anhand des Beispiels aus Abbildung 4-11 das erwähnte Randproblem ersichtlich, welches das Bild verkleinert und

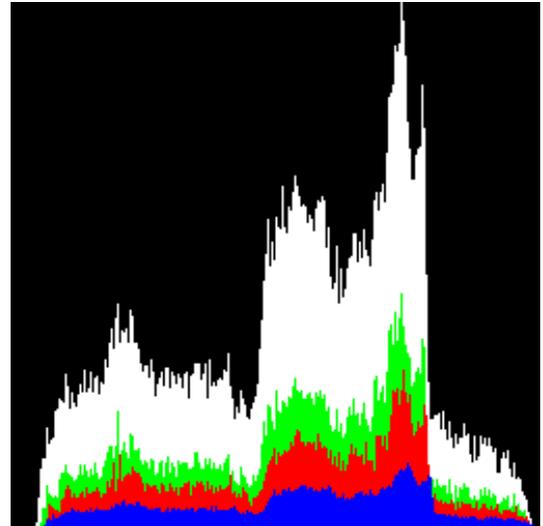


Abbildung 4-12: Vergleich von Abbildung 41

einen schwarzen Rahmen in proportionaler Breite zum Radius des Filters erzeugt.

- **Min-/Max-Filter**

Gleich dem Median-Filter werden hier die Werte sortiert, jedoch wird der Pixel mit dem Rang 1 (Min-) beziehungsweise mit dem Rang N (Max-Filter) ausgewählt. Diese Arten eignen sich für exklusives Salt- oder Pepper-Rauschen, was eher die Ausnahme darstellt. Es besteht auch die Möglichkeit bei einem Max-Filter den zweitgrößten Wert zu wählen, um so für bestimmte Arten von Pepper-Noise ein besseres Ergebnis zu erlangen. Des Weiteren neigen diese Filter das Bild vor allem in detailreichen Szenen zu verdunkeln beziehungsweise aufzuhellen. Die Gründe hierfür sollten aus dem bisher Beschriebenen selbsterklärend sein.

- **Midpoint-Filter**

Dieser Filter errechnet den Mittelwert aus dem Pixel mit dem höchsten und dem niedrigsten Rang. Man beachte, dass im Gegensatz zum später aufgeführten Average-Filter, nur der höchste und niedrigste Wert in die Berechnung einfließen, anstatt den Mittelwert aller Levels zu errechnen. Gut geeignet ist der Filter für Gauß'sches Rauschen.

### 4.2.3.2. Mean-Filter (linear)

Mean Filter haben grundsätzlich die Aufgabe eine Art von Mittelwert der Pixel im Untersuchungsfeld zu finden. Der einfachste Weg ist das arithmetische Mittel zu berechnen.

- **Arithmetic Mean-Filter**

Die aufsummierten Pixelwerte werden durch ihre Anzahl ( $N^2$ ) dividiert und ergeben so den Mittelwert aller vorhandenen. Wenn das Beispiel von dem Order-Filtern noch gilt, berechnen sich aus der Pixelmenge  $\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_{N^2}\}$  die einzelnen Werte  $f$  an der Bildposition  $x$  und  $y$  durch

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N^2} I_i \quad (11)$$

Wobei auch hier das Sliding Window-Prinzip gilt, und so das ganze Bild sukzessive berechnet wird. Durch seine Charakteristik lokale Variationen in einem Bild rauszufiltern, spricht man von einem Tiefpass-Filter.<sup>85</sup> Auf dieser Glättungseigenschaft begründet sich auch seine Wirkung auf das Rauschen, das quasi durch Weichzeichnung der Details raus fällt. Ausgedrückt als Faltungsprozess wären alle Koeffizienten  $1/N^2$ , die auf die einzelnen Pixel angewendet werden (vgl. obige Formel).

- **Geometric Mean-Filter**

$$\hat{f}(x, y) = \sqrt[N^2]{\prod_{i=1}^{N^2} I_i} \quad (12)$$

Diese Variante berechnet den Mittelwert der Untersuchten durch Produktbildung der einzelnen Werte und anschließendem Wurzelziehen mit der Potenz  $N^2$ . Ähnlich zum arithmetischen Mittelwertfilter tendiert er zum Weichzeichnen, verliert aber dennoch wesentlich weniger Details.<sup>86</sup>

- **Alphatrimmed Mean-Filter**

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{N^2 - 2T} \sum_{i=T+1}^{N^2-T} I_i \quad (13)$$

Der Alphatrimmed Mean-Filter ist dank seines Parameters  $T$  in der Lage, sein Verhalten zwischen dem eines Arithmetischen Mittelwert Filters für  $T=0$  und einem Median Filters

<sup>85</sup> vgl. Umbaugh 2005, 19f

<sup>86</sup> vgl. Gonzalez, Woods 2002, 231f

(bei  $T=(N^2-1)/2$ ) zu variieren. Dieser Parameter reduziert die Liste der untersuchten und gemittelten Pixel jeweils um  $T$  an der unteren und oberen Grenze, wobei in den Extremfällen entweder alles bis auf den mittleren (Median) oder eben kein einzigen (Arithmetic) Wert reduziert wird. Aufgrund dieses Zwitterdaseins ist er besonders geeignet um Bilder die sowohl von Salt-n-Pepper- als auch von Gaussian-Noise gestört sind, zu bereinigen.

#### 4.2.3.3. Adaptive Filter

Trotz der soeben beschriebenen Anpassungsfähigkeit des Alphatrimmed Mean Filters entspricht er nicht der Definition eines adaptiven Filters. Denn während sein Verhalten während des Filterungsprozesses gleich bleibt (der Parameter wird alleinig *vor* der Filterung festgelegt), sind die adaptiven Filter in der Lage, ihr Verhalten den Bildeigenschaften dynamisch anzupassen. Typischerweise handelt es sich bei diesen Eigenschaften um lokale Helligkeit- und Kontrastwerte, die es ihnen so ermöglichen, erstens zwischen den verschiedenen Rauscharten zu unterscheiden und zweitens Bildinformationen zu erkennen (zumindest theoretisch). Wie sich zeigen wird, steigert das die Effektivität enorm, aber auf Kosten der Filterkomplexität.

- **Minimum-Mean-Squared-Error (MMSE) Filter**

Der MMSE Filter ist ein adaptiver Filter, der auf statistische Informationen, wie dem Mean ( $\mu$ ) und Variance ( $\sigma^2$ ) des Bildausschnittes beruht. Wobei das  $\mu$  den Grauwert und somit die Helligkeit darstellt, wohingegen der Kontrast über die Varianz ermittelt wird. Insgesamt lassen sich so vier Variablen definieren, die innerhalb des Fensters  $W$  ermittelt werden:

- (a)  $g(x, y)$ : der Wert des verrauschten Bildes im Fenster  $S(x, y)$  an der Position  $x, y$
- (b)  $\sigma_{\eta}^2$ : die Varianz des Rauschens, die das Bild  $f(x, y)$  zu  $g(x, y)$  macht
- (c)  $\mu_L$ : der lokale Mittelwert der Pixel innerhalb  $S(x, y)$
- (d)  $\sigma_L^2$ : die lokale Varianz der Pixel innerhalb  $S(x, y)$

Aus diesen Angaben lassen sich folgende wünschenswerte Filterverhalten definieren:

- 1.) Wenn kein Rauschen vorhanden ist ( $\sigma_{\eta}^2 = 0$ ), dann soll der Filter die Originalwerte  $g(x, y)$  liefern.
- 2.) Wenn die lokale Varianz  $\sigma_L^2$  im Vergleich zu der Gesamten ( $\sigma_{\eta}^2$ ) überdimensional groß ist, dann soll das Ergebnis der Filterung nahe dem Original sein. Es kann

davon ausgegangen werden, dass es sich um detailreiche Szenen (Kanten, ...) handelt, die erhalten werden wollen.

- 3.) Gleichen sich  $\sigma_L^2$  und  $\sigma_\eta^2$  so soll das arithmetische Mittel geliefert werden, denn statistisch gesprochen, entsprechen dieser Bedingung zum Beispiel Himmel oder Wandflächen, die übermäßig stark geglättet werden können, ohne ein Detailverlust zu erleiden.

Formal würde das folgendes für das restaurierte Bild  $\hat{f}(x,y)$  ergeben

$$\hat{f}(x, y) = g(x, y) - \frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_L^2} [g(x, y) - \mu_L] \quad (14)$$

Auf eine Diskussion über die Ermittlung von  $\sigma_\eta^2$  oder die Problemfälle wenn  $\sigma_\eta^2 > \sigma_L^2$  wird, sei hier verzichtet und stattdessen auf adäquate Literatur verwiesen, die diese Themen in die Tiefe verfolgen.<sup>87</sup>



Abbildung 4-13: Original, Gaussian Noise, Arithmetic Mean Filter, MMSE Filter

<sup>87</sup> Gonzalez, Woods 2002

Generell gesprochen liefert der MMSE Filter das ungefilterte Bild zurück, wobei mit Abhängig von dem behandelten Detaillevel Originalwerten subtrahiert werden, die dafür mit den lokalen Meanvalues ausgeglichen werden.

Abbildung 4-13 (b) zeigt das Originalbild, das mit einem Gauß'schem Rauschen der Varianz von 800 und einem Mittelwert von 0 gestört. Der arithmetische Mittelwertfilter (c) reduziert zwar das Rauschen merklich, lässt aber auch kaum mehr Details übrig. Der MMSE-Filter hingegen ist in der Lage den Großteil der Fehler zu eliminieren und dennoch ein beachtliches Maß an Details zu erhalten. Der Dynamikverlust des Bildes resultiert aus den Problemfällen die bei der Entwicklung des Filters angesprochen wurden. Ebenso war bei der Anwendung des Filters die Varianz des Rauschens von 800 bekannt, ohne dessen Wissen der Filter wesentlich schlechter abgeschnitten hätte. Die auffälligen Ränder, die unbearbeitet erscheinen, rühren von dem unbehandelten Randproblem.

- **Adaptive Median Filter**

Dieser adaptive Filter setzt bei dem in Kapitel 4.2.3.1 besprochenen Nachteil der Größe des Subimages an, das wenn zu groß gewählt, bei Shotnoise Strukturveränderungen und einen Paintereffekt hervorrufen. Er ist ähnlich zu den Orderfiltern besonders für Salt-n-Pepper Noise geeignet, ist aber auch in der Lage, andere Rauscharten auszugleichen.

Grundidee ist einfach gesprochen, mit einer kleinen Bearbeitungsfläche anzufangen, und die solange zu erweitern, bis ein spezielles Kriterium erreicht ist. Zu diesem Zweck müssen wieder ein paar Variablen definiert werden:

- (a)  $g_{\min}$ ,  $g_{\max}$ ,  $g_{\text{med}}$  = minimaler/maximaler/durchschnittlicher Grauwert innerhalb des Fensters  $S(x, y)$
- (b)  $N_{\max}$  = maximale Größe des Fensters ( $N \times N$ )
- (c)  $g(x, y)$  = aktueller Grauwert an der Position  $x, y$  im Fenster  $S(x, y)$

Der Ablauf des Filters wird im Folgenden als Pseudocode skizziert:

Level A:	
Wenn ( $g_{\min} < g_{\text{med}} < g_{\max}$ )	dann gehe zu Level B
Ansonsten	erweitere Fenstergröße $N=N+2$
Wenn ( $N \leq N_{\max}$ )	dann gehe zu Level A
Ansonsten	gib $g(x, y)$ aus
Level B:	
Wenn ( $g_{\min} < g(x, y) < g_{\max}$ )	gib $g(x, y)$ aus
Ansonsten	gib $g_{\text{med}}$ aus

Level A dient primär dazu, um zu erkennen, ob der Median Filter Output Schwarz oder Weiß ist (Impuls). Falls nicht, wird in Level B getestet, ob es sich bei dem untersuchten Pixel  $g(x, y)$  selbst um einen Salt- oder Pepperwert handelt. Wenn nicht, wird der Pixel unverändert ausgegeben, da er nicht beeinträchtigt ist. Sollte es sich um einen Extremwert handeln (Impulsrauschen), so wird der Medianwert ausgegeben, der ja selbst kein Schwarz- oder Weißwert sein kann (siehe Level A). Wäre der Medianlevel von Anfang an ein Impulswert gewesen, so wäre das Fenster erweitert worden, und die Prozedur hätte nochmals von vorne begonnen. Solange, bis das entweder kein Impulswert rück gegeben wird, oder die maximale Fenstergröße erreicht ist. Beim ersten Fall tritt wieder Level B in Kraft, das wieder sicherstellt, das Rauschen zu entfernen. Lediglich die beschränkte Fenstergröße könnte zu einem verfrühten Abbruch des Prozesses führen und  $g(x, y)$  zurückgeben, ohne Aufschluss zu besitzen, ob es sich dabei um einen Impulswert handelt oder nicht.

Nach jeder Wertausgabe (unabhängig welcher Natur) werden die Werte zurückgesetzt und das Fenster weitergerückt, bis das Ganze Bild abgedeckt wurde.<sup>88</sup>



**Abbildung 4-14: Adaptive Median-Filter als Hardware-Lösung<sup>89</sup>**

Obige Abbildung 4-14 zeigt die Wirksamkeit eines adaptiven Median Filters, angewendet auf ein äußerst starkes Salt-n-Pepper Rauschen mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,3. Die vor allem in den dunklen und hellen Partien übrig gebliebenen Falschpixel sind letztlich auf die begrenzte Fenstergröße zurückzuführen. Zudem spannt dieses Bild den Bogen zu den in Kapitel 4.1 beschriebenen Hardwareverfahren, denn der in Abbildung 4-14 verwendete Adaptive Median Filter wurde zu Testzwecken als Hardwarelösung in Form eines Komparators und anderwärtiger Schaltung realisiert.<sup>90</sup>

<sup>88</sup> vgl. Gonzalez, Woods, 241f

<sup>89</sup> Díaz-Sánchez, Ramírez-Angulo 2001, 289

<sup>90</sup> vgl. Díaz-Sánchez, Ramírez-Angulo 2001

## 5. Beispielprogramme

Im folgenden Abschnitt sollen kommerzielle Programme und Methoden vorgestellt werden, die es sich (unter anderem) zum Ziel gesetzt haben, Rauschen in Bildern zu beseitigen. Da verständlicherweise kaum ein Programm die genauen Mechanismen seines Programms bekannt gibt, wird auf Mutmaßungen verzichtet. Aufgabe dieses Kapitels ist es lediglich die Einstellmöglichkeiten und Verfahrenstechniken von ausgewählten Programmen vorzustellen und mit den bisher andiskutierten Hardware- und Softwaremethoden zu vergleichen. Über die Effektivität der einzelnen Methoden wird erst in Kapitel 6 referiert, in dem in Anlehnung an die ISO Norm 15739 ein verrauschtes Testbild als Referenzobjekt herangezogen wird.

Die Auswahl der hier angeführten Softwareprogramme begründet sich einerseits auf eine ausgewogene Darstellung der verschiedenen Ansatzpunkte, andererseits wird Rücksicht auf die Testergebnisse des ausführlichen Testberichts von Michael Almond genommen.<sup>91</sup>

Zum Zweck einer besseren Übersichtlichkeit finden sich im Anhang A sämtliche beurteilten Programme im Überblick, inklusive deren verfügbaren Versionen und Preismodelle.

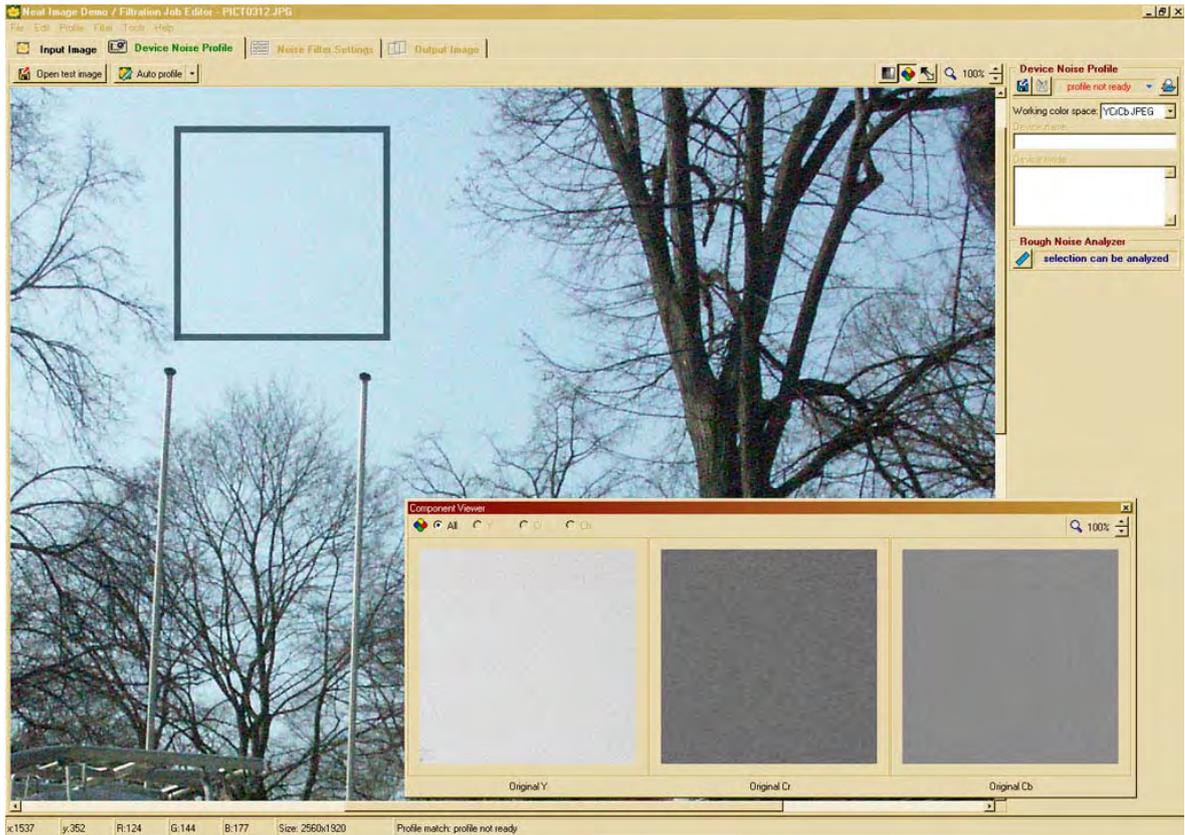
### 5.1. Neat Image 5 (ABSsoft)

Dieses bereits seit Jahren (mittlerweile in der Version 5) existierende Programm der russischen Softwareschmiede ABSsoft erscheint immer wieder ganz vorne in den Rankings diverser einschlägiger Fotografiemagazinen und Foren. Der Grund dafür scheint in der Ausgereiftheit, Effektivität und nicht zu letzt in der für nicht kommerzielle Nutzung kostenlosen Home Version zu sein. Diese Erfahrung zeigt sich auch in der ausgezeichneten Dokumentation, die in über 60 Seiten einen hervorragenden Einblick in die Wirkungsweisen bietet und die Grundlage für den hier dargebotenen Überblick des Programms liefert.<sup>92</sup>

---

<sup>91</sup> Almond 2005

<sup>92</sup> ABSsoft 2005



**Abbildung 5-1: Überblick über Neat Image (und der Selection Area)**

Neat Image arbeitet, wie viele andere vergleichbare Produkte, mit einem Sample des Bildes, den es auf Rauschen untersucht und somit ein Rauschprofil zu erstellen versucht. Das ist eine typische Vorgehensweise, die bereits im Kapitel 4.2.2 (Analysemethoden) angesprochen wurde. Abbildung 5-1 zeigt die Oberfläche und das Auswahlfenster, mit dem ein möglichst detailarmer Bereich mit einer Größe von mindestens 60x60 Pixel selektiert werden soll. Tabelle 5-1 aus dem Handbuch zeigt, wie sich je nach Größe die analysierten Frequenzen und somit die resultierende Qualität unterscheiden (nicht analysierte Bereiche müssen extrapoliert werden)<sup>93</sup>.

Size of Array [px*px]	Analysed Frequencies	Rating
200–300	High, Medium, Low and Very Low	Best
100–200	High, Medium, Low	Good
60–100	High, Medium	Ok
30–60	High	Poor

**Tabelle 5-1: Größe der Subimages und die Ergebnisse**

<sup>93</sup> vgl. ebd., 26

Leider schweigt sich der Hersteller über genauen Angaben bezüglich der Terme „hohe, mittlere, niedrige und sehr niedrige“ Frequenzen aus, allerdings kann man davon ausgehen, dass es sich bei der niedrigen und sehr niedrigen Detailhäufigkeit mit zirka 200 Pixel Größe um JPG-Artefakte handelt, die in gewisser Weise ebenfalls Rauschen darstellen.

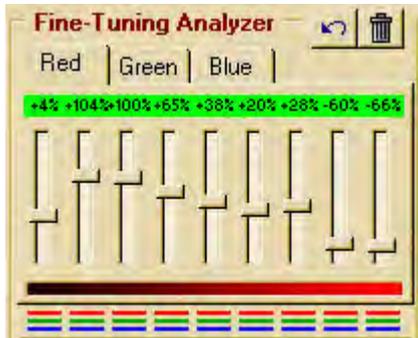


Abbildung 5-2: Rauschprofil Justage

Abbildung 5-2 zeigt das Ergebnis einer solchen Bildanalyse, wobei für jeden Farbkanal (Rot, Grün, Blau) und in Abhängigkeit deren Helligkeit im Bild (9 vom hellsten zum dunkelsten Bereich aufgeteilt) ein Wert ermittelt wurde.

Dieses Profil des Rauschens selbst einzustellen erfordert einiges an Erfahrung und auch Glück, weshalb es wie bereits beschrieben möglich ist, durch Angabe eines detailfreien Bereichs, Neat Image diese Arbeit erledigen zu lassen. Optional kann das Programm auch selbsttätig mehrere Bereiche aus dem Bild ermitteln und anhand derer die Levels anpassen. Liegt jedoch kein ausreichend großer Bildbereich vor, der zur Analyse herangezogen werden kann, so besteht die Möglichkeit, vorgefertigte Profile für bestimmte Kameras und Einstellungen entweder selbst zu erstellen (anhand mitgelieferter Test- oder anderer aufgenommenen Bilder) oder direkt vom Hersteller des Programms zu beziehen. Dies ist durchaus praktikabel, denn selbst wenn das Rauschen von Bild zu Bild und natürlich erst recht von Kamera zu Kamera verschieden ist, so ähnelt es sich sehr wohl in den Frequenz- und Farbkomponenten. Deshalb bietet der Hersteller auf seiner Website zahlreiche Profile für die verschiedensten Kamerahersteller, Modelle und Einstellungen zum (kostenlosen) Download an, die einmal im Programm importiert, über Vergleich mit den EXIF-Datensatz des Bildes angewendet und wenn erforderlich auch abgeändert werden können. Als Kalibrierungshilfe für ein eigenes Profil steht ein vorgefertigtes Testbild zur Verfügung, das abfotografiert oder eingescannt zur Analyse herangezogen werden kann.



Abbildung 5-3: Kameraspezifisches Rauschprofil

Wurde das Bild ausreichend analysiert, hat das Programm genügend Informationen über das Rauschen gesammelt und die eigentliche Filterung kann beginnen. Dies erfolgt im Normalfall in zwei Stufen, wobei in der ersten die Rauschcharakteristik noch angepasst werden kann (was wird als Störungen detektiert) und zweitens das Verhalten, wie dieses identifizierte Rauschen behandelt werden soll, anpassbar ist.

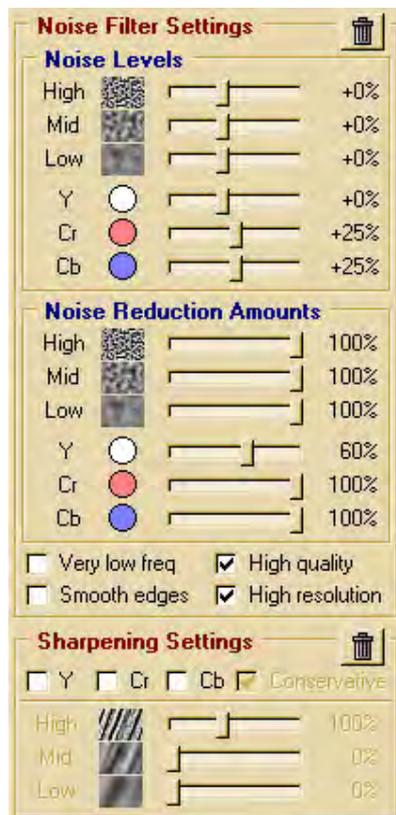


Abbildung 5-4: Filtereinstellungen

Wie bereits im Kapitel Rauscharten angedeutet, tritt Rauschen in Abhängigkeit der Helligkeit und Farben unterschiedlich auf. So entsteht zum Beispiel bei Aufnahme mit hohen ISO-Werten ein eklatant hohes Maß an Farbrauschen, welches hier gezielt adressiert werden kann. Während Y den Luminanzanteil der Pixelinformation repräsentiert, liegt in Cr der rot bis blau-grüne und in Cb der blau bis gelbe Farbanteil versteckt. Diese Werte sind aber nur relativ zu dem zuvor ausgewählten Rauschen zu verstehen. So bedeutet 0% bei den Noiselevels lediglich, dass sämtliches bisher als Rauschen qualifiziertes frequenzmäßig zu 100%, in der Helligkeit zu 60% reduziert wird. Die getroffene Abstufung von Luminanz und Farbreduktion (60 zu je 100%) hat seine Begründung in der relativen Unempfindlichkeit des Auges gegenüber Farbvariationen, die deshalb komplett entfernt werden können, ohne das Bild maßgeblich zu beeinträchtigen.



Abbildung 5-5: Cr-Komponentenansicht / hohe, mittlere und tiefe Frequenzen (von links)

Obige Abbildung zeigt zum Beispiel die mögliche starke Filterung des rot bis blau-grünen Anteils des Bildes in Abhängigkeit deren auftretenden Frequenz.

Zusätzlich zu der Rauschunterdrückung ist Neat Image in der Lage ein Schärfen des Bildes vorzunehmen. Prinzipiell ist Schärfen bei einem verrauschten Ausgangsbild kontraproduktiv, da diese Prozedur die Störungen durch Kontrastanhebung an den Kanten (Über- und Unterschwingen der Helligkeitskurve durch Unsharp-Masking) verstärkt zur Geltung bringt. Doch genau an diesem Punkt setzt das Programm an und verwertet die örtliche Information über das soeben eliminierte Rauschen und unterlässt es an diesen Stellen. Zusätzliche Parameter wie eine Aufsplittung in den Frequenz- und Farbbereich ermöglicht die notwendige Dosierung dieser Aktion.

Das Programm existiert als Standalone- und Plugin-Version für Photoshop in zahlreichen Editionen, die von einer für nicht kommerziellen Einsatz kostenlosen bis zu einer Pro+, die auch 16bit Tiff Bilder verarbeiten kann, reichen. Als Nachteile werden sehr oft die langen Verarbeitungszeiten und das fehlende Hot Pixel Removal angeführt. Wobei zweiteres sicher in absehbarer Zeit zum Funktionsumfang hinzugefügt werden wird.

## **5.2. Dfine 1.0 (nik multimedia inc.)**

Dfine von nik multimedia, inc. ist trotz seiner relativen Neuheit (erst in Version 1.0) ebenfalls ein Name der häufig fällt, wenn von professioneller Rauschbehandlung gesprochen wird. Dieses in Kalifornien ansässige Unternehmen entwickelt verschiedenste Bildenhancement Tools (von Schärfen bis Farbkorrektur) die nicht nur inhaltlich, sondern auch preislich an den professionellen Benutzer adressiert sind. Dieser Anspruch an Professionalität spiegelt sich auch im Support wieder, der zum Beispiel ein komplettes White Paper zum Thema Rauschen anbietet, welches im Rahmen dieser Arbeit schon des Öfteren Erwähnung fand. Aufgrund des Leistungsspektrums des Herstellers geht auch Dfine eine Spur weiter und beschränkt sich nicht nur auf das Rauschunterdrücken, sondern bietet auch an, nachträgliche Korrekturen (z.B. an der Farbe) vorzunehmen. Da diese nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, wird auf deren Einsatz hier verzichtet.

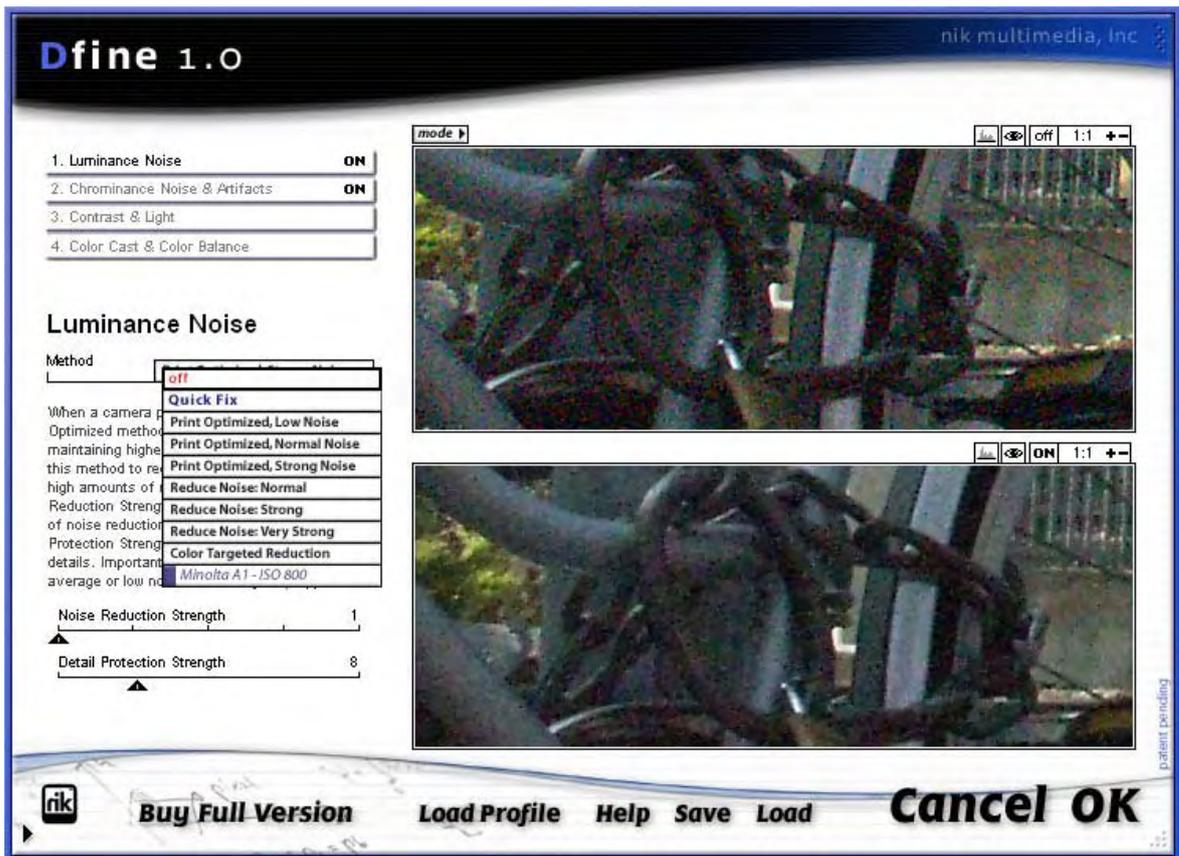


Abbildung 5-6: Dfine 1.0 als Photoshop Plugin

Obige Abbildung zeigt die relativ simple Aufteilung des Programms in Luminance, Chrominance und Kontrast bzw. Farbabstimmungsmodule. Ähnlich zu Neat Image ist Dfine in der Lage, sich relevante Teile des Bildes selbst zu suchen und auf Rauschen zu überprüfen. Jedoch ist es hier nicht möglich, die Subimages selbst zu bestimmen, was einerseits eine Erleichterung des Workflows, andererseits aber auch eine Bevormundung des Benutzers darstellt, der so keinen Einfluss auf die Auswahl des detailarmen Bereichs hat.

Es lassen sich auch kameraspezifische Profile einladen, die das Verhalten der Filterung maßgeblich beeinflussen. Doch im Vergleich zu vorigem Programm schlagen die mit rund 60 € zu Buche und lassen sich auch nicht selbst erstellen, was immerhin den Vorteil birgt, dass der Hersteller für die Qualität der Profile bürgt.



Abbildung 5-7: Dfine Selective Tool

Ein nützliches Feature des Programms ist das so genannte Dfine Selective (Abbildung 5-7), mit dessen Hilfe intuitiv Rauschen als solches mittels eines Pinsels markiert werden kann. Spezielle Vorgaben für Haut, Haare, Schatten und dergleichen erleichtern die Auswahl und passen das Verminderungslevel dementsprechend an.

Weitere erwähnenswerte Funktionen wären farbspezifische Rauschunterdrückung (z.B. für einfarbige Himmel) und ein Analysemodul, mit dem kontrastreiche Bereiche des Bildes gezielt hervorgehoben werden können.

### **5.3. Noise Ninja 2.1.0 (PictureCode LLC)**

Picture Code LLC, eine kleine und junge Firma in Texas hat es geschafft ein erstaunlich effektives und dennoch simples Rauschunterdrückungstool zu programmieren, das die Vorzüge der beiden zuvor genannte „Platzhirsche“ kombiniert und auch noch kostengünstig zu erwerben ist (ab rund 35 \$).

Die wichtigsten Keyfeatures im Überblick:

- automatische und manuelle Rauschprofilerstellung (mittels Subimages)
- kostenlose vorgefertigte Kameraprofile
- Berücksichtigung der EXIF-Daten
- Kalibrierungsbild zur eigenständigen Erstellung eines Profils
- Farbspezifische Reduktionseinstellungen (Colortargeting)
- JPG Artefakt Reduzierung
- getrennte Einstellungsmöglichkeit für Luminanz- und Chrominanzkanal
- integrierte Nachschärfemöglichkeit (mit Halo Unterdrückung)
- Pinsel zur Nachbesserung von verrauschten / rauschfreien Bereichen
- Standalone und Adobe Photoshop Plugin Version

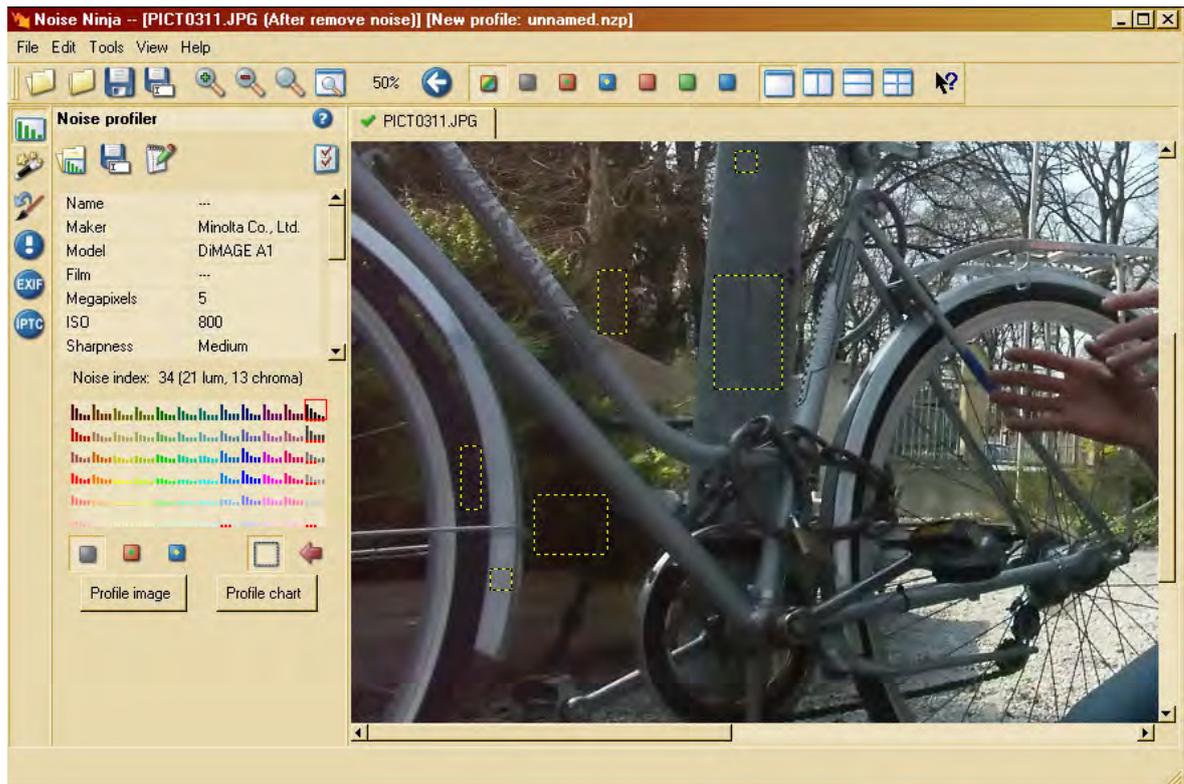


Abbildung 5-8: NoiseNinja 2.1.0 von PictureCode LLC

#### 5.4. Noise Remove (Stephan Stoske)

Nicht zu dem Reigen der großen bisher vorgestellten Softwarefirmen, sondern eher zu den Hobbyprogrammierern zählt sich Stephan Stoske, der sich privat mit Möglichkeiten der digitalen Bildbearbeitung beschäftigt. So hat er unter anderen ein beachtliches Programm zur Rauschunterdrückung entworfen hat, das sich ähnlich zur MRDI-Technik aus Kapitel 4.1.6 die Tatsache zu Nutzen gemacht hat, dass mehrfaches Auslesen des selben Bildes den Störabstand entscheidend erhöht. So stellt er auf seiner Website<sup>94</sup> sein Programm Noise Remove zur Verfügung, das natürlich unter den Vorbehalt von statischen Szenen (keine Bewegung) erstaunliche Ergebnisse liefert.

<sup>94</sup> <http://www.stoske.de/digicam> (12. 05. 2005)



Abbildung 5-9: 1-, 4- & 16-faches Sampling (von links)<sup>95</sup>

Abbildung 5-9 zeigt den logarithmischen Zusammenhang, der beim zweiten Bild den größten Effekt zeigt und dann immer mehr abnimmt.

Zusätzlich lässt sich auch noch durch eine Belichtungsreihe (zum Beispiel -0.3, 0 und +0.3 EV) der Dynamikumfang drastisch erhöhen, da eine Vermittlung vom dunkelsten zum hellsten Bild geschehen kann (und zusätzlich auch noch das Rauschen minimiert wird).

### 5.5. Weitere Rauschunterdrückungsprogramme

Im Rahmen dieser Arbeit wurden weiters noch folgende Softwareprogramme berücksichtigt:

- Grain Surgery (Visual Infinity)
- Quantum Mechanic Pro (Camera Bits)
- Noise Fixer (Fixer Labs)
- Picture Cooler (Ronnie Kroonenberg)
- Noiseware (Imagenomic)

Obwohl einige davon durchaus respektable Ergebnisse liefern (siehe nächstes Kapitel) wurde von einer näheren Betrachtung in diesem Abschnitt Abstand genommen, da sich die Verfahren im Workflow sehr ähnlich sind und mit den bisher diskutierten die wichtigsten Möglichkeiten bereits abgedeckt sind.

Des Weiteren existieren noch zahlreiche Tipps und Kniffe (zum Teil für Photoshop), die in den Foren im Internet kursieren um das Rauschen in den Griff zu bekommen (und nebenbei noch mehr leisten als so manche professionell vertriebenen Lösungen). Da diese Techniken aber teilweise nur schwer nachvollziehbar sind und zum Teil äußerst kameraspezifisch sind, wurde hier auf eine weitere Behandlung derer verzichtet.

<sup>95</sup> <http://www.stoske.de/digicam> (12. 05. 2005)

## 6. Messung

Dieses Kapitel dient dazu, die im vorigen Abschnitt angesprochenen kommerziellen Rauschunterdrückungsprogramme auf deren Effizienz zu testen und in Folge die aufgestellten Hypothesen beantworten zu können.

### 6.1. Aufbau

Um die Ergebnisse möglichst nachvollziehbar zu gestalten, wird auf ein Testbild zurückgegriffen, das vom ISO Konsortium nach deren Richtlinie 15739:2003 herausgegeben und in dieser Form bei vielen Testlabors im Einsatz ist, verwendet. Dieses Ursprungsbild wird gleichmäßig mit einem Gauß'schen Rauschen ( $\mu = 0$ ,  $\sigma^2 = 100$ ) verrauscht und stellt so das Ausgangsobjekt sämtlicher Programme dar. Zur eigentlichen

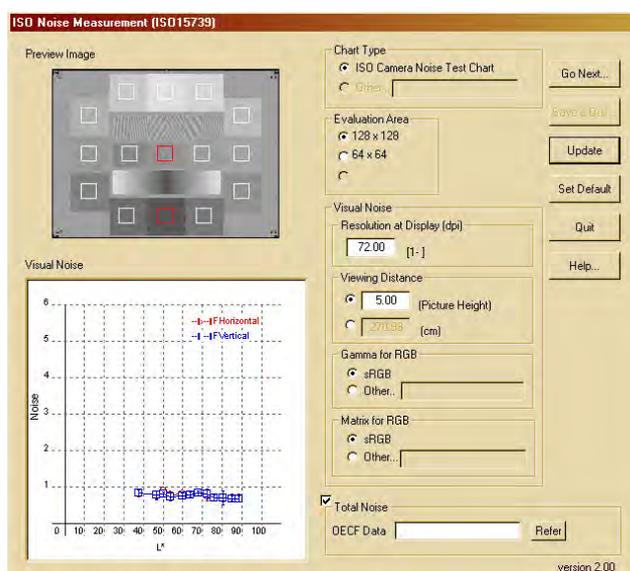


Abbildung 6-1: ISO 15739 Noise Measurement Plug In

Messung wird ein Photoshop-Plugin, das vom Konica Minolta Technology Center, Inc. entwickelt und auf der Homepage von „International Imaging Industry Association“ (I3A) zur Verfügung steht, verwendet.<sup>96</sup> Dieses Tool ist speziell für das ISO Testchart ausgelegt und analysiert die grauen Flächen auf auftretende Fluktuationen. Ergebnis ist eine Tabelle, die unterm Strich einen Wert für das auftretende Rauschniveau liefert.

Zusätzlich zu dem Rauschmaß (das bei der Messung im Vordergrund steht) werden noch Informationen über

- die benötigte Verarbeitungszeit der Berechnungsalgorithmen,
- die notwendigen Schritte für die Einstellungen (exklusive Bild laden, speichern oder dergleichen),
- die letztendlich verbleibende Schärfe

gesammelt.

<sup>96</sup> www.i3a.org (03. 06. 2005)

Manche Programme bieten Nachschärfen als gezielte Option an, welches unter der Voraussetzung einer Nichtanhebung des Rauschens aktiviert wird. Bei einstellbarem Schärfegrad wird zudem der Punkt gesucht, an dem keine „Halos“ (Überbetonen der Ränder in Form eines weißen Saums) entstehen. Da sich die Schärfe (in diesem Zusammenhang) nicht direkt messen lässt, muss auf eine optische Überprüfung zurückgegriffen werden. Die, da subjektiv, nicht direkt in die Wertung mit einfließt. Dazu wird das feine Strichmuster in der Bildmitte beurteilt, das noch genügend Kontrast zwischen den Linien aufweisen muss, beziehungsweise welche Testsamples im Vergleich zu den anderen besser abschneiden (im relativen Vergleich). Des Weiteren wird auch der Übergang zwischen den Graubereichen überprüft, der wie im Original, eine klare Linie ergeben muss und nicht etwa durch Weichzeichnung verschliffen wird (Stichwort: Edge-Detection).

Einige Programme inkludieren eine Autokontrast-Funktion, die aktiviert bleibt und teilweise das Bild klarer erscheinen lässt. Auch dies wird nicht bewertet, da der Kontrast nicht direkt mit dem Rauschen einhergeht und eine Tonwertkorrektur Teil der Nachbearbeitung eines jeden Bildes (nach der Rauschunterdrückung) ist.

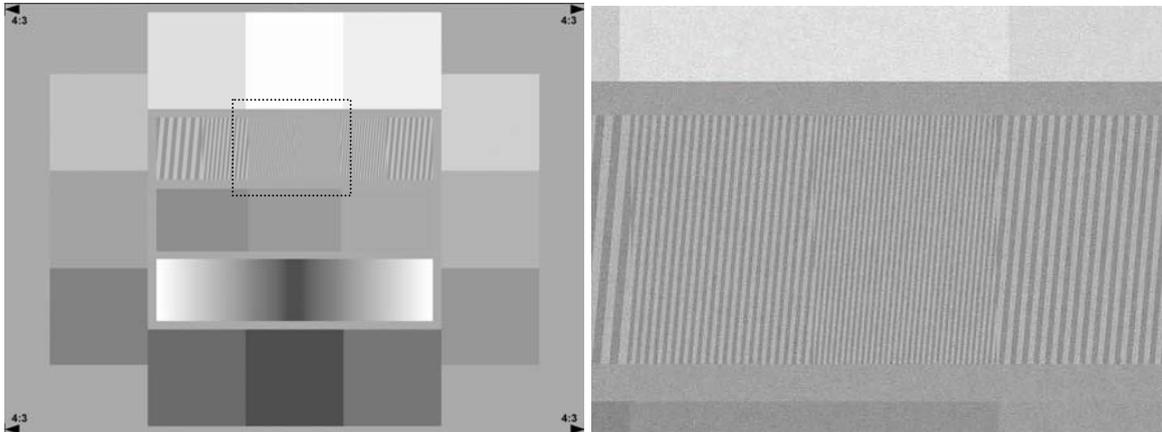
Der komplette Versuch wird mehrmals voneinander unabhängig wiederholt, um sicherzustellen, dass die Einstellungen nach besten Wissen und Gewissen optimal konfiguriert sind. Daraus lässt sich auch schon ableiten, dass Benutzer mit langer Erfahrung in dem speziellen Programm durchaus bessere Ergebnisse liefern könnten.

Die Komplexität eines Programms spiegelt sich in der Anzahl der notwendigen Schritte wieder, die zum Beispiel One-Click Lösungen mit Automatik-Profilierstellungen hervorhebt.

Im Falle eines Wasserzeichens im resultierenden Bild (sämtliche eingesetzten Programme sind als Vollfunktions-Demoversionen im Einsatz), wird dies um die Messung durchführen zu können, unter Rücksichtnahme auf den Verbleib des Rauschens entfernt. Dies ist möglich, da die Rasterweiten der überlagerten Wasserzeichen über dem der Größe der Graufächen liegen und somit ohne zusätzliche Artefakte die Flächen retuschiert werden können.

## 6.2. Durchführung

Der oben beschriebene Aufbau geht von folgendem Ausgangsbild aus, das mittels CVIP Tools 3.9 (von Scott E Umbaugh, PhD entwickelt), mit einem Gauß'schen 100er Rauschen verfremdet.



**Abbildung 6-2: das Originalbild (links) und ein Ausschnitt des Verrauschten (rechts) als Referenz**

Wie bereits dargelegt, stellt diese Art von Rauschen eine gute Grundbasis für die tatsächlich auftretenden Störungen bei Kameras dar.

Diese beiden Bilder ergeben die Endbereiche der Mess-Skala dar und je näher eine Angleichung an das Ursprungsbild gelingt, desto besser wird eine Software eingestuft.

In der Durchführung wird nun

- das verrauschte Bild geöffnet (im Programm oder in Photoshop bei Plug In's),
- sämtliche notwendigen Einstellungen getroffen (und mitprotokolliert),
- der Filter angewendet (dabei die Zeit gemessen),
- das bearbeitete Bild abgespeichert,
- im Adobe Photoshop geöffnet (falls das Programm kein Plug-In ist),
- das ISO Measurement Tool gestartet, die Messung vollzogen und
- das Ergebnis der Messung als Excel File abgespeichert.

Um eine Nachvollziehbarkeit der Messung zu gewährleisten werden im Folgenden die getroffenen Einstellungen dargelegt.

Bezeichnung	Hersteller	Version	Variante	Einstellungen
Dfine	nik multimedia, inc.	1.000-051603	Plug In	Reduce Noise: <b>Very Strong</b> Strength: <b>Large 3</b> Punkte 2-4: Off
Grain Surgery	Visual Infinity	2	Plug In	Samples: <b>10</b> Size: <b>64</b> Position: Automatic Noise Reduction: <b>200%</b> Passes: <b>5</b> Multichannel Sharpen: <b>20%</b> / 1 / 0,001
Neatimage	AB Soft	5 Demo	Standalone	<b>Auto Profile</b> <b>Remove All Noise</b> Schärfen: Y 100% / 0 / 0 / Conservative
Noisefixer	Fixer Labs	1.1.7	Plug In	Luminance: <b>60%</b> Color: 100%
Noise Ninja	Picture Code LLC	2.1.0	Standalone	<b>Auto Profile</b> Luminance: <b>+15</b> Smooth: <b>5</b> Contrast: <b>5</b> Colors: 0 / 0 / 0 Sharpen: 60% / 1,2
Noiseware Professional	Imagenomic, LLC.	3.3 Build 3302	Plug In	<b>Full Suppression</b>
Picture Cooler	Ronnie Kroonenberg	1.0.60-1	Standalone	<b>1,5</b> / 0 / 0
Quantum Mechanic Pro	Camera Bits	2.1r3	Plug In	Red Chrominance: <b>16 Px</b> / 0 Blue Chrominance: <b>16 Px</b> / 0 <b>Auto Contrast Range</b>

**Tabelle 6-1: die getesteten Programme und deren Einstellungen**

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei sämtlichen Programmen um die Demo- bzw. freizunutzbaren Versionen, die von den Homepages der Hersteller bezogen wurden. Die Versionen sind zum Stand der Messung die aktuell verfügbaren und bei den Plug-Ins handelt es sich um die für Adobe Photoshop CS. Die fett markierten Einträge in der Spalte der Einstellungen symbolisieren die Optionen, die verändert/aktiviert werden müssen, um zu dem Endergebnis zu gelangen. Nicht angeführte Optionen wurden nicht verändert und entsprechen den Standardeinstellungen des Programms. Die so erstellten Bilder werden nun separat in höchster Qualität als JPGs abgespeichert, um sicherzugehen, kein weiteres Artefaktrauschen hinzuzufügen.

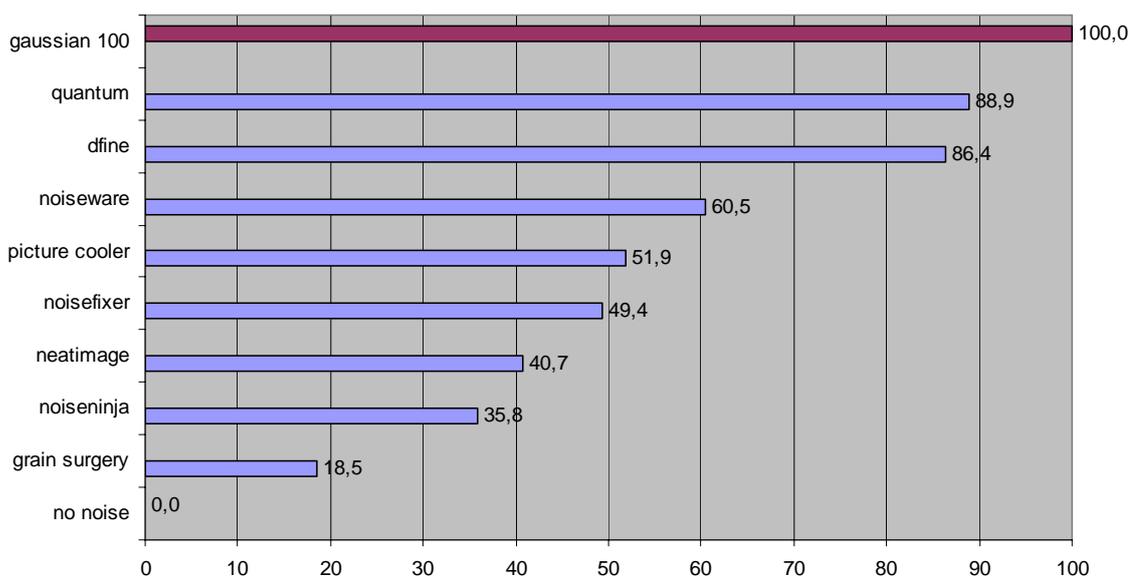
### 6.3. Auswertung

Wie bereits erwähnt, stellen das unverrauschte und das gestörte Bild die Endbereiche der Skala dar und werden so mit 0 bzw. 100% Rauschen bezeichnet. Die vom verwendeten Tool gelieferten Werte geben in Folge die vom Ausgangsrauschen übrig gebliebenen Reststörungen wieder und werden ebenfalls in Prozent dargestellt. Aus diesem Grund spiegelt ein niedriger Prozentwert eine gute Qualität wider (= verbliebenes Rauschen in Prozent).

Platz	Bezeichnung	Rauschwert	Prozent
	<i>no noise</i>	0,03	0,0
1	grain surgery	0,18	18,5
2	noiseninja	0,32	35,8
3	neatimage	0,36	40,7
4	noisefixer	0,43	49,4
5	picture cooler	0,45	51,9
6	noiseware	0,52	60,5
7	dfine	0,73	86,4
8	quantum	0,75	88,9
	<i>gaussian 100</i>	0,84	100,0

Tabelle 6-2 zeigt zunächst lediglich die Ergebnisse des Rauschens (ohne Usability) des Programms. Gut ersichtlich ist, dass die Null Prozent Marke von keinem der Programme erreicht wird.

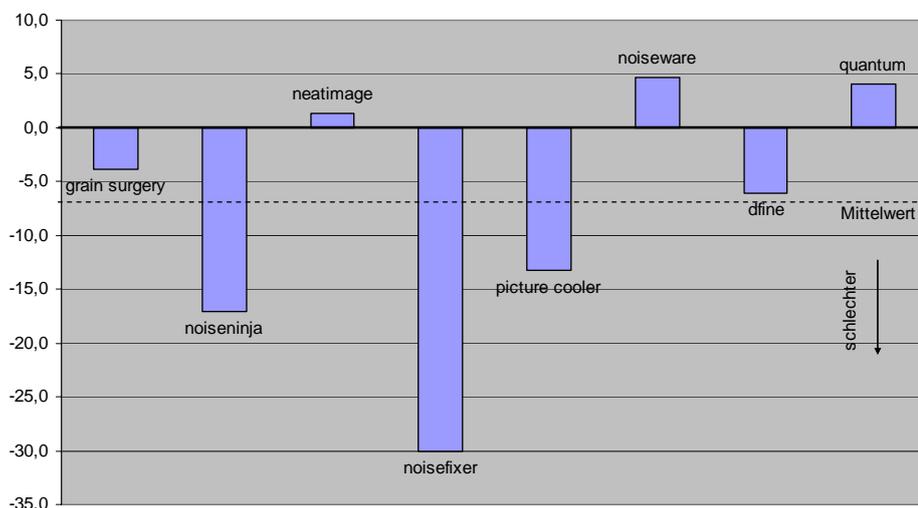
**Tabelle 6-2: Ergebnisse Gaussian 100**



**Diagramm 6-1: Vergleichsdiagramm der Performance bei Gaussian 100 (in Prozent)**

Anhand der obigen Darstellung lässt sich das Testfeld anschaulich in drei Leistungskategorien einteilen. Abgesehen von Grain Surgery, das zumindest laut den Testwerten extrem gut abgeschnitten hat, und den beiden letztplatzierten Quantum Mechanic Pro und Dfine, ist ein dicht gedrängtes Mittelfeld, das offensichtlich sehr ähnliche Algorithmen zu verwenden scheint. Vollständigerweise muss erwähnt werden, dass Quantum Mechanic Pro von Camera Bits eigentlich nicht zur Beseitigung des hier aufgetretenen Luminanzrauschens programmiert ist (sondern für Chrominanzrauschen). Allerdings sei ebenso angemerkt, dass Band Aide, das tatsächliche Produkt dieses Herstellers für diese Rauschform ein noch wesentlich schlechteres Ergebnis geliefert hat (sowohl optisch als auch meßtechnisch) und deshalb auf das geringere der beiden Übel zurückgegriffen wurde.

Eine erneute Messung bei wesentlich stärkerem Rauschen (Varianz = 800) ergab eine im Durchschnitt knapp 8 Prozent schlechtere Leistung der einzelnen Programme. Besonders die Programme Picture Cooler, Noise Ninja und Noise Fixer zeigten mit 13, 17 beziehungsweise 30 % ein deutlich schlechteres Ergebnis und scheinen deshalb für so starkes Rauschen nicht geeignet zu sein. Quantum Mechanic Pro und Noiseware konnten zwar relativ gesehen besser mit dem starken Rauschen verfahren als die Konkurrenz (vgl. Diagramm 6-2), schnitten aber insgesamt immer noch vergleichsweise schlecht ab.



**Diagramm 6-2: Veränderung von Gaussian 100 auf 800 (in Prozent)**

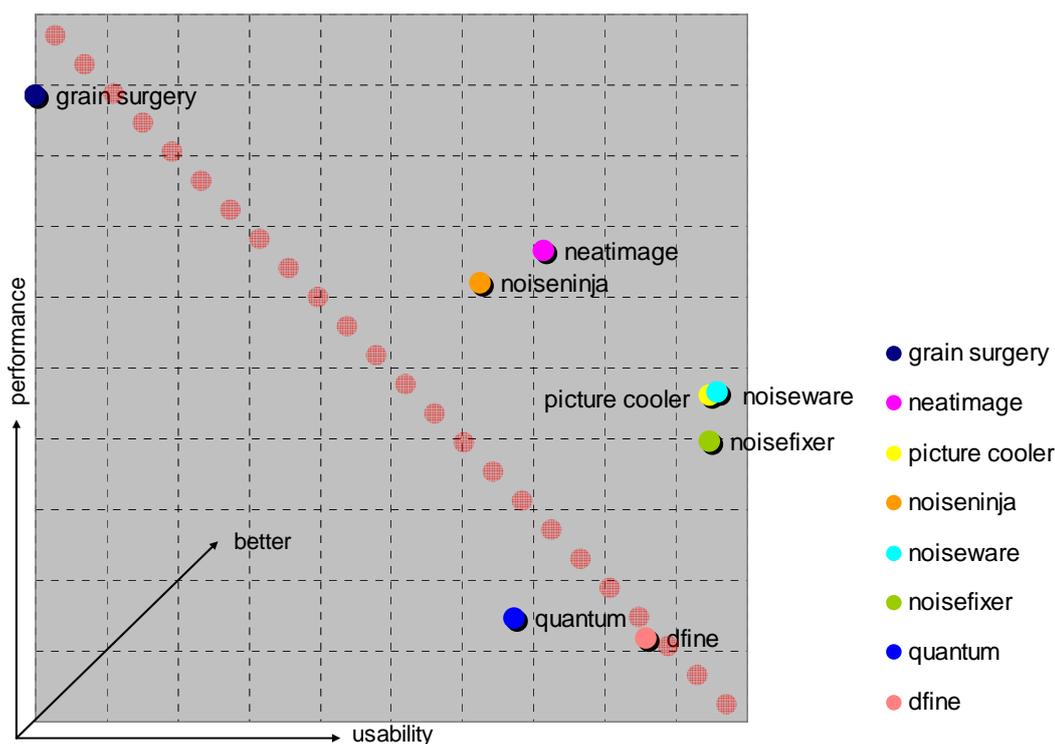
Die bisherig gelieferten Aussagen bezogen sich lediglich auf die Performance und ließen die benötigte Zeit und den Einstellungsaufwand außen vor. Im Folgenden wird dies in Form einer Tabelle nachgeholt, die einen Überblick über die Usability der einzelnen Tools verschafft.

Zunächst werden die absoluten gemessenen Werte präsentiert (sowohl die Leistung, als auch die Usability), rechts davon die relative Lage im gesamten untersuchten Feld in Prozent. Bei der Zeit und den Einstellungsschritten (Steps) sei erwähnt, dass der höchst vorgekommene Wert die 100 Prozent Marke dargestellt und sich die anderen danach richten. Im letzten Teil der Tabelle werden sämtliche prozentualen Angaben gemittelt und ergeben so einen Messwert der Gesamtperformance.

Programm	100	800	Zeit [s]	Steps	100 [%]	800 [%]	Zeit [%]	Steps [%]	Overall [%]	#
grain surgery	0,18	0,41	53	5	18,5	22,4	100,0	100,0	60,2	7
neatimage	0,36	0,69	6	3	40,7	39,4	11,3	60,0	37,9	3
picture cooler	0,45	1,12	5	1	51,9	65,0	9,4	20,0	36,6	2
noiseninja	0,32	0,92	4	4	35,8	52,8	7,6	80,0	44,0	5
noiseware	0,52	0,97	4	1	60,5	55,8	7,6	20,0	36,0	1
noisefixer	0,43	1,36	5	1	49,4	79,4	9,4	20,0	39,6	4
quantum	0,75	1,45	10	3	88,9	84,8	18,9	60,0	63,1	8
dfine	0,73	1,58	3	2	86,4	92,5	5,7	40,0	56,2	6
min	0,18	0,41	3	1	Anmerkung: Testsystem war ein 2GHz Intel Centrino mit 512 MB DDR und Windows XP					
max	0,75	1,58	53	5						
average	0,47	1,06	11,25	2,50						

**Tabelle 6-3: Gesamtüberblick über alle Programme (absolut und relativ)**

Hier zeigt sich auch der Preis, den ein performanceseitig tadelloses Programm wie Grain Surgery zu bezahlen hat, um diese Ergebnisse erzielen zu können. Sowohl ein Maximum an Zeit und Schritte ergeben insgesamt einen erstaunlich schlechten Platz 8, wohingegen DFine trotz zweimaligem schlechten Unterdrückungsleistungen dann doch dank schneller und einfacher Handhabung den besseren 7. Platz belegt. Rein rechnerisch scheint dieser Spagat zwischen Leistung und Usability dem Programm Noiseware am besten zu gelingen, jedoch liegt es mit einem beinahe dreimal höheren Restrauschen als das voran liegende Programm relativ weit hinten. Eine detaillierte Aufschlüsselung zwischen der Effizienz des Algorithmus und der Benutzerfreundlichkeit liefert Diagramm 6-3, wobei der Durchschnittswert der ersten beiden Spalten aus Tabelle 6-3 (100 und 800) auf der Y-Achse, den Performancewerten der Zeit- und Steps-Spalte auf der X-Achse gegenüberstehen.



**Diagramm 6-3: Gegenüberstellung Performance / Usability**

Die rosa punktierte Linie signalisiert einen Übergang zwischen effektiv, komplexen und einfach, aber minder qualitativen Programmen. Besonders die Programme Grain Surgery und Dfine stellen die Paradebeispiele für die in diesem Zusammenhang untersuchte Ambivalenz der Eigenschaften Effizienz und Usability dar. Während sich das Eine durch maßtechnisch hervorragenden Ergebnisse, dafür mit einem aufwendigen und langwierigen Ablauf präsentiert, ist Zweiteres zwar rasch in der Umsetzung, liefert aber auch unterdurchschnittliche Resultate. Besonders die lange Renderzeit von 53 Sekunden bewirkt das besonders schlechte Abschneiden des Programms Grain Surgery. Diese ergibt sich aus den fünf Durchläufen, die der Algorithmus zur Berechnung der Filterung vornimmt. Es sei erwähnt, dass dieses Programm die Anzahl der Durchläufe (Passes) als Option anbietet und sich so die Zeit (aber auch die Qualität) nach unten drücken lassen.

Final soll noch die Schärfe analysiert werden, die wie aus bereits erwähnten Gründen nicht rechnerisch miteinbezogen wird. Stattdessen werden in Anhang B Ausschnitte der Testbilder in Originalgröße (nur so lässt sich die Schärfe beurteilen) dargestellt.

In dem Weißbereich am linken Rand ist auch die automatische Kontrastanhebung von Quantum Mechanic Pro deutlich, die versucht hat, die hellen Farbtöne reiner erscheinen zu lassen.

## 6.4. Interpretation

Die Auswertung hat gezeigt, dass es durchaus Programme gibt, die in der Lage sind, vorhandenes Rauschen erstaunlich gut zu vermindern. Allerdings ist anhand der Tabelle 6-2 ebenso ersichtlich, dass kein Programm wirklich sämtliches Rauschen erkannt und beseitigt hat. Dies liegt hauptsächlich daran, dass dies gar nicht wünschenswert ist, denn wie bereits im Kapitel der Rauscharten dargelegt, bedarf jedes Bild eines gewissen Grundmaßes an undefinierten Fluktuationen um „lebendig“ zu wirken. Aus diesem Grund scheint auch keines der Programme dafür ausgelegt zu sein (trotz der Option „Remove All Noise“ bei Neat Image).

Somit ist es erforderlich die Hypothese:

- **„Kein Programm kann Bildrauschen komplett aus einem Bild entfernen.“**

differenziert zu beantworten. Denn war zwar kein Programm in der Lage sämtliches Rauschen zu entfernen, so hat doch ein Großteil des Testfeldes einen erstaunlichen Wert von ca. 50 % des Anfangsrauschens entfernt. Eine zuverlässige Aussage, ob dieser Wert reicht um ein Bild rauschfrei erscheinen zu lassen bzw. um dessen oben beschriebene „Lebendigkeit“ zu erhalten, kann pauschal nicht beantwortet werden. Diese Entscheidung hängt sehr stark von dem Qualitätsbewusstsein des Betrachters und von dem Bild selbst ab.

Bezüglich der Hypothese des Detailspekts

- **„Rauschunterdrückung ist stets mit einem Detailverlust verbunden.“**

muss festgehalten werden, dass die Grundstruktur zwar stets erhalten bleibt, allerdings sehr wohl ein Verlust von feinen Einzelheiten zu verzeichnen ist. Eine exakte Kantentrennung ist bei keinem Bild der getesteten Programme mehr möglich und weist so auf einen Detailverlust hin. Die Begründung dafür scheint auf der Hand zu liegen, denn eine einmal durch das überlagerte Rauschen verlorene Information kann unmöglich wieder vollständig hergestellt werden. Sämtliche auf Interpolation basierende Methoden sind von Annahmen abgeleitet, die allzu oft einfach unrichtig sind.

Hier zeigt sich, dass Neat Image und Noiseninja als Programm die besten Lösungen anbieten, denn nur die beiden waren in der Lage, die Übergänge zwischen hellen und dunklen Partien klar zu erhalten. Grain Surgery hingegen hat das gesamte Bild abgedunkelt und sich so dem Durchschnittsgrau des Rauschens angenähert. Was zwar meßtechnisch durchaus respektable Leistungen vollbringen mag, dem Auge des Benutzers aber nicht standhält.

---

Final soll noch geklärt werden, ob die Aussage

- **„Je effektiver ein Programm gegen Rauschen vorgeht, desto aufwändiger und langwieriger ist dessen Ablauf.“**

ebenso zutrifft. Am einfachsten lässt sich dies mit Diagramm 6-3 beantworten, das genau diese beiden Faktoren anschaulich aufschlüsselt. Unter zu Hilfenahme der rot punktierten Achse in diesem Diagramm lassen sich in Anbetracht einer gewissen Streuung durchaus die Positionen der Programme innerhalb dieses Bereiches ausmachen. Somit hält die aufgestellte Hypothese einer Untersuchung stand und belegt, dass kein Programm sowohl in der Usability als auch in der Effizienz gleichermaßen ausgezeichnet abschneidet (Ecke rechts oben). Ebenso wie kein Programm in beiden Kategorien gleichzeitig versagt (Ecke links unten). Als Schlussfolgerung geht hervor, dass also ein Kompromiss zwischen den beiden Faktoren eingegangen werden muss, der offensichtlich den Programmen Neat Image und Noise Ninja am besten gelingt.

## 7. Reflexion und Zusammenfassung

Zusammenfassend sollen nochmals die Ergebnisse dieser Arbeit und eventuell offene Punkte aufgelistet werden.

Anfangs wurden die elektrotechnischen Grundlagen des Aufnahmeprozesses dargelegt, die die Umgebungsvariablen für die Rauschentstehung bilden. So wurden die einzelnen hauptsächlich in Gebrauch befindlichen Chiptypen CCD und CMOS ebenso beleuchtet wie sich in Entwicklung befindliche Prototypen.

Darauf aufbauend untersuchte diese Arbeit die verschiedensten Rauschvarianten, die sich grundlegend in Random- und Fixed Pattern Noise aufteilen lassen. Während ersteres rein zufälliger Natur ist und sich von Bild zu Bild ändert, ist es bei dem Patternrauschen möglich, bestimmte Muster zu erkennen und die mittels Subtraktion rauszurechnen. Außer dem Photonenrauschen, das von der verrauschten Natur der Lichtteilchenemission der Sonne stammt, sind die meisten Random Noise Arten auf die thermischen Instabilitäten der Elektronen zurückzuführen.

Welche Ansätze dagegen eingesetzt oder gerade erforscht werden, zeigte Kapitel 4, das sich mit dem Hauptteil dieser Arbeit, den Gegenmaßnahmen beschäftigte. Zunächst wurde anhand Hardwarelösungen demonstriert, wie es gelingt, das Rauschen zu isolieren und in Folge zu beseitigen. Manche Verfahren gehen aber einen anderen Weg und versuchen durch gezieltes Schaltungsdesign Rauschfaktoren zu vermindern. Allerdings zeigte sich in diesem Zusammenhang die ganzheitliche Problematik, die Rauschen in einem System darstellt. Nur eine über den eigentlichen Ansatzpunkt hinausgehende Betrachtungsweise verspricht eine unter dem Strich erfolgreiche Rauschbilanz.

Die Softwaremethoden bildeten den zweiten Teil dieses vierten Kapitels und gewährten einen groben Einblick in die mathematische Theorie, mit der das Rauschen beschrieben werden kann. So wurden die zwei für diesen Zusammenhang wichtigsten Rauschvorkommen charakterisiert. Mit Hilfe des Gauß'schen- und Salt-n-Pepper Rauschens können im Wesentlichen sämtliche zuvor dargestellten Störungen nachgebildet und folglich analysiert werden. Diese Analysemethoden erlauben es den nachfolgend dargelegten Softwareprogrammen das Bild auf eventuelles Rauschen zu untersuchen und dementsprechende digitale Filter anzuwenden. Auch auf dieses Thema wurde im Rahmen dieser Arbeit in Form des Kapitels 4.2.3 – digitale Filter eingegangen. Die drei

unterschiedlichen Filterungskonzepte der Order-, Mean- und Adaptive Filter fanden so Erwähnung.

Die Programme Neat Image (ABSsoft), Dfine (nik multimedia, inc.), Noise Ninja (Picture Code LLC) und Noise Remove (Stephan Stoske), die die Basis für das fünfte Kapitel bilden, stellen einen repräsentativen Querschnitt der auf dem Markt befindlichen Programme zum Thema Rauschverminderung dar. Denn mit Hilfe dieser Beispielprogramme ließen sich die grundlegenden Vorgehensweisen solcher Programme demonstrieren und Verknüpfungen zum vorigen Beispiel der mathematischen Theorie darlegen.

Abschließend galt das sechste Kapitel der Messung dieser und noch 5 weiterer Programme, die die aufgestellten Hypothesen weitgehend bestätigen konnte. Mittels eines einfachen Testbildes und einem Programms zur Rauschmessung konnte so eine in Anlehnung an die vom ISO Konsortium vorgeschlagene Messung durchgeführt werden. Sämtliche Einstellungsparameter und Ergebnisse wurden aufgelistet und in Folge zu Interpretationszwecken diskutiert.

Wie sich zeigte, kann kein Programm sämtliches aufgetretenes Rauschen aus einem Bild entfernen. Wobei aber Kapitel 3 zum Thema Bildrauschen offen legte, dass dies auch nicht erforderlich sei, um ein Bild für die menschliche Auffassung qualitativ einwandfrei darzustellen.

Weiters ließ sich festhalten, dass Rauschverminderung zwangsläufig mit einem Detailverlust zu verbunden sein scheint. Denn selbst die besten Programme waren nicht im Stande alle Details des Ausgangsbildes wiederherzustellen. In wie weit dieser Verlust der Struktur eine Qualitätsminderung darstellt kann nur im Einzelfall entschieden werden.

Zuletzt behandelte diese Arbeit die Frage nach der Komplexität solcher Softwareprogramme, im direkten Vergleich mit dessen Effektivität. Hier bestätigte sich, was schon in der Hypothese angenommen wurde. Um ein gewisses Level an Qualität bieten zu können, ist es notwendig detaillierte Parameter zur Einstellung vorzunehmen. Erst dadurch kann ein Programm genug Wissen über das vorhandene Rauschen sammeln, um es dann gezielt beseitigen zu können.

Abschließend bleibt noch zu klären, welche Punkte diese Arbeit unangetastet ließ, beziehungsweise welche Aspekte es darauf aufbauend zu erarbeiten gilt.

Zum einen sind das die Hardwaremöglichkeiten, die hier kaum hinterfragt und nicht getestet wurden. Dazu ist allerdings ein breiter technischer Hintergrund und eine ebensolche Forschungseinrichtung erforderlich. Es ist auch schwer, bis unmöglich solche Schaltungstechnologien zu testen, denn ein gezielter direkter Vergleich wie es bei den Softwareprogrammen möglich war, erweist sich hier als ungleich schwerer.

Zum anderen wäre es interessant, zusätzlich zum Testbild des ISO Konsortiums, verschiedene alltagstaugliche Bilder zu vergleichen. Diese würden sich zwar nicht so einfach messen lassen, allerdings würden sie mehr Aufschluss über das wirkliche Verhalten der getesteten Programme bieten. Denn das Testbild entspricht erwiesenermaßen kaum einem durchschnittlichen Alltagsbild, für die solche Programme ursprünglich entworfen wurden.

Generell lässt sich sagen, dass es aufgrund der breiten Streuung des Themas Bildrauschen schwer war sämtliche Aspekte mit einzubeziehen, weshalb zum Beispiel ein alleiniger Fokus auf die Hardwaremöglichkeiten durchaus noch Stoff zu einer weiterführenden Recherche bietet. Dies begründet sich schon allein auf dem Grund, dass der Digitalsektor nach wie vor in einer Aufbruchstimmung steht und sich so jeden Tag neue Perspektiven und Entwicklungen ergeben, die es wert sind, aufgearbeitet zu werden.

Für weiterführende Informationen ist ein Blick in die jeweilig angeführten Literaturen zu empfehlen.

Nichts desto trotz sollte es dieser Arbeit gelungen sein, die ursprüngliche Fragestellung der wichtigsten Konzepte und Ideen der digitalen Rauschunterdrückung bei Digitalkameras zufrieden stellend zu beantworten.

## 8. Quellenverzeichnis

**ABSoft** (2005). Neat Image. To make images look better. User Guide. Document version 5, May 22, 2005

Available: <http://www.neatimage.net/files/NIUGv5.0.zip> (03. 06. 2005)

**Almond, M.** (2005). Noise Reduction Tool Comparison.

Available: <http://www.michaelalmond.com/Articles/noise.htm> (03. 06. 2005)

**Bosco, A. & Findlater, K. & Battiato, S. & Castorina, A.** (k. A.). A Temporal Noise Reduction Filter Based On Image Sensor Full-Frame Data

Available: [http://www.dmi.unict.it/~battiato/download/ICCE03\\_FPN.pdf](http://www.dmi.unict.it/~battiato/download/ICCE03_FPN.pdf) (03. 06. 2005)

**ColorFoto** (2005). Standards setzen. aus Color Foto. Ausgabe 4/2005. Stuttgart: Vereinigte Motor-Verlage GmbH & Co. KG

**Díaz-Sánchez, A. & Ramírez-Angulo, J.** (2001). Analog Adaptive Median Filters for Impulse Noise Removal

Available: <http://www.eurasip.org/content/Eusipco/2000/sessions/TueAm/PO3/cr1762.pdf> (03. 06. 2005)

**Eastman Kodak Company** (2005). CCD Image Sensor Noise Sources Revision 2.1

Available: <http://wwwde.kodak.com/global/plugins/acrobat/en/digital/ccd/applicationNotes/noiseSources.pdf> (03. 06. 2005)

**Enz, C. & Temes, G.** (1996). Circuit Techniques for Reducing the Effects of Op-Amp Imperfections: Autozeroing, Correlated Double Sampling, and Chopper Stabilization aus Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No. 11, November 1996

**Fairchild Imaging** (2004). CCD486. 4k x 4k Image Area Full Frame CCD Image Sensor

Available: <http://www.fairchildimaging.com/main/library/pdf/ccds/ccd486.pdf> (03. 06. 2005)

**Foveon, Inc.** (2002). Foveon X3. See what you've been missing.

Available: <http://www.alt-vision.com/documentation/Foveon-X3-Brochure.pdf> (03. 06. 2005)

**Fowler, B. & Balicki, J. & How, D. & Godfrey, M.** (k. A. a). Low FPN High Gain Capacitive Transimpedance Amplifier for Low Noise CMOS Image Sensors.

Available: [http://www.fairchildimaging.com/main/documents/lfpn\\_ctia\\_spie\\_01.pdf](http://www.fairchildimaging.com/main/documents/lfpn_ctia_spie_01.pdf) (03. 06. 2005)

**Fowler, B. & Godfrey, M. & Balicki, J. & Canfield, J.** (k. A. b). Low Noise Readout using Active Reset for CMOS APS.

Available: [http://www.fairchildimaging.com/main/active\\_reset\\_spie\\_00.pdf](http://www.fairchildimaging.com/main/active_reset_spie_00.pdf) (03. 06. 2005)

**Fowler, B.** (2002). Low Noise Wide Dynamic Range Image Sensor Readout using Multiple Reads During Integration (MRDI)

Available: [http://www.fairchildimaging.com/main/mrdi\\_000.pdf](http://www.fairchildimaging.com/main/mrdi_000.pdf) (03. 06. 2005)

**Gilblom, D. & Keun Yoo, S. & Ventura, P.** (2003). Real-time color imaging with a CMOS sensor having stacked photodiodes

Available: <http://www.alt-vision.com/documentation/5210-14.pdf> (03. 06. 2005)

- Göhring, D.** (2002). Digitalkameratechnologien. Eine vergleichende Betrachtung. CCD kontra CMOS. Humboldt Universität zu Berlin.  
Available: <http://www.informatik.hu-berlin.de/~goehring/papers/ccd-vs-cmos.pdf> (03. 06. 2005)
- Gonzalez, R. & Woods, R.** (2002). Digital Image Processing. 2 Aufl. Prentice Hall
- Gruev, V. & Etienne-Cummings, R. & Horiuchi, T.** (2004). Linear Current Mode Imager With Low Fix Pattern Noise.  
Available: [http://www.isr.umd.edu/Labs/CSSL/horiuchilab/pubfiles/conference/gruev\\_etal2004.pdf](http://www.isr.umd.edu/Labs/CSSL/horiuchilab/pubfiles/conference/gruev_etal2004.pdf) (03. 06. 2005)
- Hamamtsu** (2003). Characteristics and use of FFT-CCD area image sensor. Technical Information  
Available: [http://usa.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics\\_and\\_use\\_of\\_\\_FFT-CCD.pdf](http://usa.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of__FFT-CCD.pdf) (03. 06. 2005)
- Hogan, T.** (2004). Nikon D2H Review  
Available: <http://www.bythom.com/d2h.htm> (03. 06. 2005)
- Hornsey, R.** (1999a). Design and Fabrication of Integrated Image Sensors. Appendix B – CCD Technology  
Available: [http://www.cs.yorku.ca/~visor/pdf/AppB\\_CCD.pdf](http://www.cs.yorku.ca/~visor/pdf/AppB_CCD.pdf) (03. 06. 2005)
- Hornsey, R.** (1999b). Design and Fabrication of Integrated Image Sensors. Appendix C – Other Imager Types  
Available: [http://www.cs.yorku.ca/~visor/pdf/AppC\\_CCD.pdf](http://www.cs.yorku.ca/~visor/pdf/AppC_CCD.pdf) (03. 06. 2005)
- Hornsey, R.** (1999c). Design and Fabrication of Integrated Image Sensors. Part III – Noise in Image Sensors  
Available: [http://www.cs.yorku.ca/~visor/pdf/CMOS\\_3.pdf](http://www.cs.yorku.ca/~visor/pdf/CMOS_3.pdf) (03. 06. 2005)
- Krautzner, W.** (2004). Digital Fotopraxis. Leitfaden für Profis und Einsteiger. Wien: Report Verl.
- Lim, S. & Gamal, A.** (2002). Gain Fixed Pattern Noise Correction via Optical Flow aus Proceedings of SPIE Vol. 4669  
Available: [http://www-isl.stanford.edu/groups/elgamal/abbas\\_publications/C087.pdf](http://www-isl.stanford.edu/groups/elgamal/abbas_publications/C087.pdf) (03. 06. 2005)
- Magnan, P.** (2003). Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view.  
Available: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) (03. 06. 2005)
- Medkeff, J.** (2004). Using Image Calibration Techniques to Reduce Noise in Digital Images.  
Available: [http://www.photo.net/learn/dark\\_noise](http://www.photo.net/learn/dark_noise) (03. 06. 2005)
- Mendis, S. & Kemeny, S. & Gee, R. & Pain, B. & Staller, C. & Quiesup, K. & Fossum, E.** (1997). CMOS Active Pixel Image Sensors for Highly Integrated Imaging Systems in IEEE Journal of solid-state circuits, Vol. 32, No. 2, February 1997  
Available: <http://www.isr.umd.edu/~retienne/www/ENEE719C/F02/DigitalCam4.pdf> (03. 06. 2005)

**nik multimedia, Inc.** (2003a). Effective Noise Reduction & Detail Optimization. An Analysis & Post Capture Processing Model. White Paper.

Available:

[http://download.nikmultimedia.com/downloads/pdf/de\\_pressreleases/NoiseReduction\\_WhitePaper.pdf](http://download.nikmultimedia.com/downloads/pdf/de_pressreleases/NoiseReduction_WhitePaper.pdf)  
(03. 06. 2005)

**nik multimedia, Inc.** (2003b). Dfine 1.0. Handbuch.

Available: [http://download.nikmultimedia.com/downloads/pdf/de\\_guides/Dfine\\_UserGuide.pdf](http://download.nikmultimedia.com/downloads/pdf/de_guides/Dfine_UserGuide.pdf)

(03. 06. 2005)

**PCtipp** (2004). Mehr als nur Fotos. aus PCtipp Ausgabe Mai 2004. Zürich: IDG Communications AG Vlg.

**Schindler, K.** (2004). CCD-Technik in der Astronomie – Erkennung von Defektpixeln einer CCD-Matrix am Beispiel einer ST-8 Kamera

Available: <http://saardok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/34/pdf/Arbeit.pdf> (03. 06. 2005)

**Shih, Y. & Wu, C.** (2004). A New CMOS Pixel Structure for Low-Dark-Current and Large-Array-Size Still Imager Applications. aus IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, Vol. 51, No. 11, November 2004

**Umbaugh, S.** (2005). ECE 438. Digital Image Processing. Chapter 9. Image Restoration

Available: [http://www.ee.siue.edu/~sumbaug/CVIPbook\\_PPLec/Chapter%209a.ppt](http://www.ee.siue.edu/~sumbaug/CVIPbook_PPLec/Chapter%209a.ppt) (03. 06. 2005)

**Young, T., & Gerbrands, J., & van Vliet, L.** (2002). Fundamentals of Image Processing.

Available: <http://www.ph.tn.tudelft.nl/DIPLib/docs/FIP.pdf> (03. 06. 2005)

**Zielke, T.** (2000). Bildverstehen und Visualisierung I. Filterung von Bildern (2D-Filter).

Available: <http://193.23.171.171/download/zielke.htm> (03. 06. 2005)

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: CCD- und CMOS- Technologie im Vergleich.....	10
Abbildung 2-2: Mikrolinsen beugen das Licht um den Fill-Faktor zu erhöhen.....	14
Abbildung 2-3: die Sony MAVICA.....	17
Abbildung 2-4: der Ladungstransport erfolgt zunächst parallel, dann seriell.....	19
Abbildung 2-5: der Querschnitt eines CCD - Chips.....	19
Abbildung 2-6: Blooming Effekt bei intensiven Gegenlicht-Aufnahmen.....	21
Abbildung 2-7: CMOS APS-Architektur.....	23
Abbildung 2-8: Der JFET LBCAST-Sensor von Nikon.....	25
Abbildung 2-9: Aufnahme mit einem Bayer-Mosaik (links) und einem Stacked Sensor (rechts).....	27
Abbildung 3-1: Blind Area Artifacts (die Schärfe nahe der Lippe ist erhalten).....	29
Abbildung 3-2: ein Einzelbild von 400 (links), das erstaunliche Ergebnis (rechts).....	32
Abbildung 3-3: Luminanz- (links) und Chrominanzrauschen (rechts) - Levels angepasst.....	33
Abbildung 3-4: Read Noise bei ISO 1600 (links), bei ISO 3200 (rechts) – Levels angepasst .....	35
Abbildung 3-5: Flüssigkeitskühlung für Astronomiekameras.....	40
Abbildung 3-6: Überblick über die wichtigsten Rauschquellen.....	44
Abbildung 4-1: Die wichtigsten Metadaten.....	47
Abbildung 4-2: Anhand der vertikalen Linien erkennt man das Column FPN.....	50
Abbildung 4-3: Links und rechts der 4096 aktiven Pixel erkennt man die 18 Pixel breiten Darklines.....	51
Abbildung 4-4: Normale FPN (links) und Low FPN (rechts) CTIA APS Pixel Schaltung.....	52
Abbildung 4-5: mit (links) und ohne CDS (rechts).....	54
Abbildung 4-6: prinzipieller Prozess der Image Restoration.....	58
Abbildung 4-7: örtliche Faltung mit einer 3x3 Filtermaske.....	59
Abbildung 4-8: Original (links), Gauß'sches Rauschen (Mitte) und Salt'n'Pepper- Rauschen (rechts).....	63
Abbildung 4-9: Fourierspektrum (jeweils unterhalb) des Original- (links) und des Gauß- verrauschten Bildes (rechts).....	64
Abbildung 4-10: Detailarmes Subimage zur Rauschbestimmung.....	65
Abbildung 4-11: Originalbild, Impulsverrauscht ( $P_a=P_b=0.8$ ), Medianfilter (3x3), Medianfilter (5x5) (links oben, rechts oben, links unten, rechts unten).....	67
Abbildung 4-12: Vergleich von Abbildung 41.....	68
Abbildung 4-13: Original, Gaussian Noise, Arithmetic Mean Filter, MMSE Filter.....	71
Abbildung 4-14: Adaptive Median-Filter als Hardware-Lösung.....	73
Abbildung 5-1: Überblick über Neat Image (und der Selection Area).....	75
Abbildung 5-2: Rauschprofil Justage.....	76
Abbildung 5-3: Kameraspezifisches Rauschprofil.....	76
Abbildung 5-4: Filtereinstellungen.....	77
Abbildung 5-5: Cr-Komponentenansicht / hohe, mittlere und tiefe Frequenzen (von links) .....	77
Abbildung 5-6: Dfine 1.0 als Photoshop Plugin.....	79
Abbildung 5-7: Dfine Selective Tool.....	79
Abbildung 5-8: NoiseNinja 2.1.0 von PictureCode LLC.....	81
Abbildung 5-9: 1-, 4- & 16-faches Sampling (von links).....	82
Abbildung 6-1: ISO 15739 Noise Measurement Plug In.....	83
Abbildung 6-2: das Originalbild (links) und ein Ausschnitt des Verrauschten (rechts) als Referenz.....	85

Diagramm 2-1: linearer Zusammenhang zw. Aus- und Eingangssignal .....	12
Diagramm 2-2: typische spektrale Empfindlichkeiten .....	13
Diagramm 2-3: der Dynamikbereich wird durch das Rauschen und die Sättigung beschränkt .....	15
Diagramm 2-4: unterschiedliche Absorptionstiefen für verschiedene Wellenlängen .....	27
Diagramm 3-1: Das Verhältnis von Detail zu Rauschsignal entscheidet .....	30
Diagramm 3-2: Readout-Noise in Abhängigkeit der Frequenz .....	35
Diagramm 3-3: typisches PRNU eines CMOS-Sensors .....	36
Diagramm 3-4: Dunkelstrom in Abhängigkeit der Temperatur .....	37
Diagramm 3-5: Dunkelstrom in Abhängigkeit der Gatespannung .....	38
Diagramm 3-6: Das Rauschen in Abhängigkeit der Signalstärke .....	42
Diagramm 3-7: dominierende Rauschquellen als Funktion der Belichtung .....	43
Diagramm 3-8: SNR als Ergebnis mehrere Rauscheinflüsse .....	43
Diagramm 4-1: Das Ausleserauschen nimmt bei MRDI reziprok zu $n^{3/2}$ ab .....	54
Diagramm 4-2: Vergleich von AZ und CHS anhand einer vereinfachten PSD .....	56
Diagramm 4-3: Gauß'sche PDF .....	61
Diagramm 4-4: PDF eines Salt-n-Pepper Rauschens .....	62
Diagramm 6-1: Vergleichsdiagramm der Performance bei Gaussian 100 (in Prozent) .....	87
Diagramm 6-2: Veränderung von Gaussian 100 auf 800 (in Prozent) .....	88
Diagramm 6-3: Gegenüberstellung Performance / Usability .....	90
Tabelle 3-1: Fehler-Spezifikation eines CCD-Datenblatts (CCD486 von Fairchild Imaging / bei $-60^{\circ}\text{C}$ ) .....	39
Tabelle 4-1: PAPS im Vergleich zu herkömmlichen APS .....	55
Tabelle 5-1: Größe der Subimages und die Ergebnisse .....	75
Tabelle 6-1: die getesteten Programme und deren Einstellungen .....	86
Tabelle 6-2: Ergebnisse Gaussian 100 .....	87
Tabelle 6-3: Gesamtüberblick über alle Programme (absolut und relativ) .....	89

## Anhang A: Programmübersicht

Bezeichnung	Hersteller	Website	OS	Standalone / Plugin	Version	Preis
Neat Image	ABSoft	www.neatimage.com	Win	yes/no yes/no yes/yes yes/no yes/yes	5 Demo Home Home+ Pro Pro+	free US\$ 29,90 US\$ 49,90 US\$ 59,90 US\$ 74,90
			Mac	yes/no yes/yes -	3 Demo Pro Profiles	free US\$ 49,90 free
Dfine	nik multimedia, Inc.	www.nikmultimedia.com	Win, Mac	no/yes no/yes -	1 Demo - Profiles	free € 115,94 > € 30,-
Noise Ninja	Picture Code LLC	www.picturecode.com	Win, Mac	yes/yes yes/yes yes/no yes/yes yes/no -	2.1 demo Pro Bundle Pro Standalone Home Bundle Home Standalone Profiles	free US\$ 79,95 US\$ 69,95 US\$ 44,95 US\$ 34,95 free
Grain Surgery	Visual Infinity	www.visinf.com	Win, Mac	no/yes	2 demo -	free US\$ 179,-
Noise Fixer	Fixer Labs	www.fixerlabs.com	Win, Mac	no/yes no/yes	1.2 trial -	free € 23,42
Noiseware	Imagenomic, LLC.	www.imagenomic.com	Win Win, Mac  Win Win	yes/yes no/yes no/yes yes/no	3.3 Community Standard PlugIn Professional PlugIn Standard Professional Bundle	free US\$ 49,- US\$ 69,- US\$ 26,- US\$ 49,- US\$ 79,-
Picture Cooler	Peter Kroonenberg	denoiser.shorturl.com	Win	yes/no	1.060 -	free
Quantum Mechanic	Camera Bits	www.camerabits.com	Win, Mac	no/yes	demo Lite Band Aide Single Pro (incl. Band Aide)	free US\$ 99,- US\$ 150,- US\$ 189,-

## Anhang B: Schärfebeurteilung der Testbilder

