

Messtechnische Bewertung eines HDR-Kamerasystems in Bezug auf Broadcastanwendungen

Bachelorarbeit

vorgelegt im Studiengang Audiovisuelle Medien

an der

Hochschule der Medien Stuttgart



HOCHSCHULE DER MEDIEN

Fakultät Electronic Media

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

von

Johannes Zink

Matrikelnummer 24868

Erstprüfer: Prof. Axel Hartz
Zweitprüfer: Dipl. Ing. Jürgen Ernst
Praxisbetreuer: Dipl. Phys. Jürgen Späth

Vorgelegt am 25.08. 2014

Erklärung an Eides statt

Hiermit versichere ich, Johannes Zink, an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: "Messtechnische Bewertung eines HDR-Kamerasystems in Bezug auf Broadcastanwendungen" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), §23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. §19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. §156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen¹.

Ludwigsburg, den 25.08. 2014

Johannes Zink

¹Festgestellte Plagiate führen gemäß §26 Abs. 2 der SPO der 6-semesterigen bzw. §23 Abs. 2 der 7-semesterigen grundständigen Studiengänge bzw. §19 Abs.1 Satz 3 der SPO der Masterstudiengänge zum Verlust des Prüfungsanspruches und damit zur Exmatrikulation.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich während des Verfassens meiner Thesis unterstützt haben. Dies sind zunächst einmal die Kollegen der Abteilung Bildsensorik am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS in Erlangen, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und meine Fragen geduldig beantwortet haben. Vielen Dank auch für die unzähligen Anregungen, Ideen, Diskussionen und wertvollen Hinweise, die mir manchen Irrweg erspart und stets meinen Horizont erweitert haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dipl. Ing. Jürgen Ernst und Herrn Dipl. Ing. Andrei-Vasile Tunea, die nicht nur geduldig meine Fragen zur Halbleiterschaltungstechnik und zur Messtechnik beantwortet, sondern mich auch bei der Entwicklung des Messaufbaus beraten und unterstützt haben. Vielen Dank auch an Herrn Dipl. Phys. Jürgen Späth, der mich bei der Entwicklung der Software zur Aufnahme und Konvertierung der Messdaten beraten und unterstützt hat.

Ebenfalls möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Axel Hartz bedanken, der die Entstehung dieser Arbeit aus der Entfernung unterstützt und mich in strategischen und fachlichen Fragen stets exzellent beraten hat.

Ohne die großzügige Unterstützung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS in Vertretung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. wäre die Entstehung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich dafür bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich nicht versäumen, mich herzlich bei meiner Familie und bei meinen Freunden zu bedanken, die mich während meiner Zeit in Erlangen sehr unterstützt haben und ohne die ich diese Arbeit nicht hätte schreiben können.

Kurzzusammenfassung

Die Anforderungen von Ultra-High-Definition Television sehen neben einer höheren Ortsauflösung einen größeren Farbraum und insbesondere eine höhere Bilddynamik vor. Zur Umsetzung dieser Forderung existieren verschiedene technologische Ansätze. In dieser Arbeit soll ein Überblick über eine Auswahl verschiedener Technologien und Verfahren gegeben werden und deren Anwendbarkeit im Broadcast untersucht werden.

Zudem sollen anhand der Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der OECF des sCMOS-Bildsensors in einem Prototyp des HDR-Kamerasystems *HiDyV* des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS grundlegende Überlegungen zur Messtechnik an HDR-Kamerasystemen illustriert und deren Anwendbarkeit im Broadcast diskutiert werden.

Schlüsselworte: HDR, CMOS-Bildsensor, Kamerasystem,ameratechnik, Broadcast, Messtechnik, OECF

Abstract

The requirements of Ultra-High-Definition Television do not only demand for higher spatial resolution but also for a wider colour gamut and an extended dynamic range. As several technological approaches exist in order to meet these demands, a technological overview shall be given as well as an evaluation of the respective relevance to broadcast applications. Based on the implementation of a measurement method for capturing the optoelectric conversion function of the sCMOS imaging sensor used in a prototype of the high dynamic range camera system *HiDyV* developed by the Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, general considerations on measurement methods for the evaluation of high dynamic range cameras in terms of broadcast applications shall be reflected.

Keywords: HDR, CMOS Image Sensor, Camera, Camera System, Broadcast, Measurement Method, OECF

Inhaltsverzeichnis

1	Definitionen	1
2	Einführung	2
2.1	Ausgangssituation	2
2.2	Integration von HDR in eine HDTV-Produktion	3
2.3	Motivation für HDR-Produktionen	4
2.3.1	Logistik	4
2.3.2	Produktionsinfrastruktur	5
2.3.3	Bildgestaltung	6
2.3.4	Dokumentarische Formate	6
2.4	Vorschlag für einen abwärtskompatiblen HDR-Playout	7
3	CMOS-APS-Kamerasysteme	9
3.1	Funktionsweise	10
3.1.1	Aufbau eines Bildsensors	10
3.1.2	Photodetektor	13
3.1.3	Electronic Shutter	16
3.1.4	Füllfaktor	18
3.2	Erzeugung farbiger Bilder	18
3.2.1	3-Chip-Kamera	18
3.2.2	Color-Filter-Array	19
3.2.3	Auf wellenlängenabhängiger Absorptionstiefe beruhende Sensoren	21
3.3	DSP	21
3.3.1	DSP-Pipeline	22
3.3.2	Korrekturen	23
3.3.3	Demosaicking	24
3.3.4	Implementierung	25
4	Übersicht über Technologien zur Erzeugung von HDR-Bewegt看	26
4.1	Multikamerasysteme	26
4.1.1	Aufbau mit Strahlteiler	26
4.1.2	Lichtfeldkamera	27
4.2	Bildsensoren mit Lateral-Overflow-Capacitor-Pixeln	27
4.3	Bildsensoren mit nichtlinearer Kennlinie	28
4.4	Bildsensoren mit Stacked Photodiode Pixel	29
4.5	Bildsensoren mit Non-Regular Sampling	29
4.6	Bildsensoren mit Mehrfachbelichtung	30
4.7	Bildsensoren mit Digitalem ND-Filter	30
4.8	Multi-Readout-Bildsensoren	31
4.9	Rekonstruktion aus Color-Filter-Array	31
4.10	Bildsensoren mit Licht-Frequenz-Wandlern	31
4.11	Gradientenkamera	32

5	Messtechnische Erfassung von HDR-Kamerasystemen	33
5.1	Zielsetzung	33
5.2	Normen	34
5.3	Eignung bestehender Normen	35
5.4	Messung	38
5.4.1	Eigenschaften des zu vermessenden Kamerasystems	39
5.4.2	Zu erfassende Kenngrößen	41
5.4.3	Messaufbauten	43
5.4.4	Durchführung und Auswertung der Messung	49
5.4.5	Bewertung der Messergebnisse	52
5.4.6	Vergleich beider Messverfahren	54
5.5	Beurteilung der Messaufbauten im Bezug auf Broadcastanwendungen	55
5.6	Ausblick	56
5.7	Zusammenfassung	57
6	Quellen	59
7	Abbildungsverzeichnis	72

1 Definitionen

Bildsensor

Der Begriff Bildsensor bezeichnet einen Wandler zur Umwandlung eines zweidimensionalen optischen Signals² in ein elektrisches Signal. Die Besonderheit des Bildsensors gegenüber einer einzelnen Photodiode ist die gleichzeitige (oder pseudo-gleichzeitige) Erfassung von mehreren Helligkeitssignalen; in der Regel werden diese örtlich in fixen Rastern abgetastet. In dieser Arbeit sollen ausschließlich Bildsensoren in Halbleitertechnik, in erster Linie CMOS-Bildsensoren, betrachtet werden. Bildaufnahmeröhren (Vidicon, Ikonoskop usw.) sind, da sie sowohl im Broadcast als auch für die meisten Anwendungen der Messtechnik mittlerweile gänzlich obsolet sind, nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Kamera

Eine Kamera ist ein System zur Erfassung von Bildern. Im Falle der elektronischen Kameras werden diese als elektrische Analog- oder Digitalsignale ausgegeben. Die Kamera stellt die Systeme zur Erfassung der Bilder (Film oder im Falle elektronischer Kameras ein Bildsensor) sowie ein lichtdichtes Gehäuse mit Befestigungsmöglichkeiten für ein Objektiv, das eine Szene optisch auf den Bildsensor abbildet. Je nach Bauform können noch Komponenten zur kontrollierten Unterbrechung des Strahlengangs (mechanischer Verschluss) und zur Ausspiegelung eines Bildes in einen Viewfinder zur Kontrolle des gewählten Bildausschnitts (Kadrage) vorhanden sein.

Kamerasystem

Ein Kamerasystem ist in der Regel eine elektronische Kamera, die zusätzlich mit einem FPGA zur Ansteuerung des Bildsensors und in der Regel mit Analog-Digital-Wandlern sowie einem DSP zur Manipulation des Ausgangssignals (um ein normkonformes Signal zu erzeugen) ausgestattet ist. Je nach Bauart sind eventuell auch Komponenten zur analogen oder digitalen Speicherung oder zur Übertragung des Bilddatenstroms, zur Synchronisation mit Peripheriegeräten sowie Bedienelemente oder Bausteine zur Fernsteuerung enthalten.

HDR-Kamerasysteme

In dieser Arbeit werden Kamerasysteme betrachtet, deren Dynamikumfang den von herkömmlichen Kamerasystemen übersteigt. Derartige Kamerasysteme werden als High Dynamic Range oder auch Wide Dynamic Range Kamerasysteme bezeichnet. Beide Begriffe werden weitgehend synonym verwendet, wobei in dieser Arbeit zur Vereinheitlichung der erstere, abgekürzt mit HDR, gewählt wurde.

²Bei einigen Spezialbildsensoren kann das Signal auch eindimensional (z.B. bei einem Zeilenbildsensor) oder dreidimensional (z.B. bei einem Time-of-Flight-Bildsensor) sein. Diese Sensoren sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit, da sie für den Broadcastbereich weitgehend irrelevant sind.

2 Einführung

Dieses Kapitel soll vor dem Hintergrund der Anforderungen des Broadcast in die Thematik dieser Arbeit einführen und die Motivation für den Einsatz von HDR-Kamerasystemen im Broadcast illustrieren. Dabei sollen besonders ein Ausblick auf das Potential dieser Technologie im Zusammenhang mit einer Auswahl verschiedener Produktionsformate gegeben und limitierende Faktoren für die Einführung von HDR-Kamerasystemen in derzeit bestehende Produktionsabläufe genannt werden.

2.1 Ausgangssituation

Aufgrund der Bemühungen um eine kontinuierliche Steigerung der Bildqualität im Broadcast wurde bereits im Jahr 2012 schon kurz nach der Umstellung der Ausstrahlung von SDTV zu HDTV mit der Formulierung der technischen Parameter und Rahmenbedingungen für UHDTV³ in der Recommendation *ITU-R BT.2020* [1] die Weichen für die zukünftige technische Entwicklung gestellt. Neben der Forderung nach einer höheren Ortsauflösung rückt dabei auch die Diskussion um den Einfluss weiterer Parameter wie eines größeren Farbraums, einer höheren Framerate und eben auch einer höheren Bilddynamik auf die Bildqualität zunehmend in den Vordergrund [2].

Die Anforderungen von UHDTV stellen die Entwicklung neuer Produktionsinfrastruktur wie Bildmischer, Videoservert, Systeme zur Messung der Bildqualität, Distributionssysteme und die dafür benötigten Codierungs- und Übertragungsverfahren, sowie in besonderem Maße auch die Entwicklung neuer Kamerasysteme vor erhebliche Herausforderungen. Da besonders bei den Bildsensoren mittlerweile die physikalischen Grenzen [3] bezüglich einer weiteren Reduktion der Strukturgrößen zur Erhöhung der Auflösung bei gleichbleibender Sensorgröße weitgehend erreicht sind [4], geben hier die Anforderungen an einen größeren Farbraum und insbesondere an einen höheren Dynamikumfang die Marschrichtung für die nächsten technologischen Weiterentwicklungen vor. Seitens der Displays wurde, besonders bei Consumergeräten, in den letzten Jahren in erster Linie die Ortsauflösung der Displays weiter gesteigert, sodass derzeit erhältliche Displays mit größerem Gerätefarbraum und gesteigerter Bilddynamik wegen des hohen technischen Aufwands [5] [6] nicht nur sehr teuer, sondern auch noch weit von der gewünschten Performance entfernt sind [7]. Sie konnten sich bisher im Consumerbereich nicht durchsetzen und sind selbst im professionellen Umfeld nur selten anzutreffen. Es wird aber erwartet, dass HDR-Displays in OLED-Technologie in absehbarer Zeit diese Lücke schließen [8].

In Ermangelung HDR-fähiger Endgeräte verläuft die Entwicklung der Kamerasysteme und Produktions- und Distributionsinfrastruktur für HDR aufgrund der entsprechend geringen Nachfrage derzeit noch recht schleppend. Daher ist die recht defensive Haltung der Sendeanstalten bezüglich der Anschaffung einzelner gegebenenfalls schon erhältlicher HDR-fähiger Systemkomponenten verständlich, da neben den Anschaffungskosten vor allem die damit verbundene Umstellung von Produktionsabläufen mit erheblichen weiteren Kosten verbunden ist. Zwar kann grundlegend mit einer allgemeinen Akzeptanz dieser Technologie seitens

³Ultra High Definition TV

der Zuschauer gerechnet werden, es bleibt aber unklar, ob und wann entsprechende Endgeräte weit genug verbreitet sind, um die Risiken derartiger Investitionen zu rechtfertigen. Die zögerliche Haltung der Sendeanstalten wiederum führt zu einem verringerten Interesse der Hersteller an der Entwicklung HDR-fähiger Systemkomponenten, da zumindest kurz- und mittelfristig voraussichtlich nicht der gewünschte Absatz erreicht werden kann.

Diesem Henne-Ei-Problem könnte begegnet werden, sofern sich aus einem Einsatz HDR-fähiger Komponenten auch für die Produktion in den aktuellen HD-Formaten ein signifikanter Mehrwert ergibt. Derartige Entwicklungen haben sich in der Vergangenheit beispielsweise im Bereich *Digital Cinema* gezeigt, wo neben der höheren Ortsauflösung und einer höheren Framerate auch der gestiegene Dynamikumfang moderner Kameras in der Postproduktion gezielt genutzt wird [9]. Da jedoch im Vergleich zum Broadcast in der Filmbranche ein stark unterschiedliches Anforderungsprofil und auch ein anderes Investitionsverhalten vorherrscht, sind direkte Rückschlüsse von den Erfahrungen aus dieser Branche auf künftige Entwicklungen im Broadcast kaum möglich.

2.2 Integration von HDR in eine HDTV-Produktion nach dem aktuellen Stand der Technik

Die Vielfalt der verschiedenen Formate stellt ein breites Spektrum sehr unterschiedlicher Anforderungen sowohl an die verwendeten Kamerasysteme als auch an die Produktionsinfrastruktur, wobei an dieser Stelle unter diesem Begriff die gesamte Signalkette einschließlich der gesamten Produktions-, Postproduktions- und Sendeabwicklungstechnik verstanden sei. An dieser Stelle soll für die Betrachtung der Integration von HDR-Kamerasystemen in Standard-HDTV-Produktionen einerseits zwischen dokumentarischen Formaten⁴ und Unterhaltungsformaten⁵ sowie Nachrichtenformaten und Live-Übertragungen⁶ sowie zwischen Live-Formaten⁷ und Formaten, die nach der Aufzeichnung in der Postproduktion bearbeitet werden⁸, unterschieden werden. Diese Einordnung spiegelt weder den künstlerischen Anspruch noch die tatsächliche Programmgestaltung, sondern vielmehr eine vereinfachte Klassifizierung der Anforderungen an die Produktionsbedingungen wieder, wobei die Grenzen zwischen den Formaten sowohl inhaltlich als auch in der Anforderung an die Produktionsabläufe oft sehr fließend sind [11]. Technisch gesehen unterscheiden sich dabei die Anforderungen an Echtzeitfähigkeit, zu erreichende Bildqualität, Existenz oder Nichtvorhandensein von Möglichkeiten zur Nachbearbeitung und die Wiederholbarkeit von Takes, benötigte Bandbreiten und Anforderungen an Übertragungstrecken⁹, die Ausleuchtung des Drehorts, Verwendung von Kamerapedestals, mobilen Stativen, Steadicams, Kamerabühne oder

⁴Dokumentarfilm, Reportagen, auch Feature, Doku-Soap, Doku-Drama, auch: Pseudo-Dokumentarformate [10]

⁵Show-Formate wie Talk-Show, Panelshow, Spieleshow, Casting-Show sowie Fernsehspiel, Fernsehfilm, Daily Soap, Sitcom, usw.

⁶Nachrichtensendung, Sportübertragung, Live-Übertragung kultureller Veranstaltungen wie Konzerte, Theater, Oper usw.

⁷worunter für diese Betrachtung auch live-to-tape-Formate beziehungsweise live-to-server-Formate fallen

⁸Schnitt, Bildgebung, Compositing, Grading usw.

⁹worunter an dieser Stelle sowohl Inhouse-Strecken als auch Übertragungsanlagen für Live Kontribution [sic!] und Außenübertragungen gemäß [12] sowie die Anbindung zum Playout-Center zu verstehen sind.

Schulterkameras, die eventuelle Forderung nach Kompatibilität zu vorproduzierten Zuspielern oder Livegrafik und viele Spezialanforderungen wie das Vorhandensein von Replay- und High-Speed-Optionen bei Sportübertragungen [12] [13].

Diese Vielzahl an Parametern lässt kaum universelle Aussagen über die Eignung technischer Produktionsmittel, insbesondere der im Rahmen dieser Arbeit zu betrachtenden Kamerasysteme, zu.

2.3 Motivation für HDR-Produktionen

Da im Broadcast kaum Erfahrungswerte zu HDR-Produktionen vorliegen, kann in diesem Kapitel nur der Versuch unternommen werden, die Erfahrungen der letzten Jahre mit HDR im *Digital Cinema* in Verbindungen mit Betrachtungen basierend auf den Erfahrungen aus konventionellen HDTV-Produktionen unter Berücksichtigung der nachrichtentechnischen Grundlagen der Datenübertragung auf die Verhältnisse und Anforderungen des Broadcast zu extrapolieren. Die im Rahmen dieser Betrachtung angestellten Überlegungen sind daher weder als gesicherte Erkenntnisse noch als vollständige Darstellung, sondern als einführende Betrachtungen zur Illustration der Komplexität der Problematik zu interpretieren.

2.3.1 Logistik

An dieser Stelle ist zunächst grundlegend zwischen der Datenlogistik, also dem Aufwand zur Übertragung, Verteilung und Speicherung der Bilddaten¹⁰, und dem logistischen Aufwand einer Produktion im Sinne von Lagerhaltung, Bereitstellung und Transport technischer Produktionsmittel wie Kamera- und Bildtechnik, Scheinwerfer und Grip zu unterscheiden.

Seitens der Datenlogistik stellen HDR-Produktionen höhere Anforderungen bezüglich benötigter Bandbreiten, Speicherplatz und Rechenleistung als konventionelle Produktionen. Dies ist in der höheren Quantisierung der Bilddaten bedingt und lässt sich nur im Bereich der Übertragung und Speicherung teilweise durch effiziente Codierung ausgleichen. Durch den schon begonnenen Ausbau der Datenübertragungsnetze und durch die permanente Zunahme der Rechenleistungen computerbasierter Systeme stellt sich hier nur bedingt die Frage nach einer Umsetzbarkeit, da im Bereich *Digital Cinema* bereits zum aktuellen Stand der Technik vergleichbare Anforderungen problemlos umgesetzt werden. Die Umstellung der IT-Infrastruktur kann daher, analog zur Umstellung des gesamten Produktionsbetriebs, sukzessive erfolgen. Dies bedeutet für den Betreiber der Betriebsinfrastruktur eine erhebliche finanzielle Entlastung, da entsprechende Investitionen zeitlich verteilt erfolgen können.

Seitens der Produktionslogistik ist insgesamt mit einer Verschlankung der Produktionen zu rechnen, da beim Einsatz von HDR-Kameras, insbesondere bei dokumentarischen Formaten, die Lichtsetzung durch eine für viele Aufnahmeverfahren gesteigerte Lichtempfindlichkeit der eingesetzten Kamerasysteme stark reduziert wird oder sogar komplett entfallen kann. Die hohe Dynamik von Szenen muss nicht mehr durch Aufhellung dunkler Bereiche künstlich reduziert werden [13], sodass auch in schwierigen Beleuchtungssituationen dadurch weit-

¹⁰wobei die Programmdistribution in die verschiedenen Verbreitungsnetze im Kapitel 2.4 *Vorschlag für einen abwärtskompatiblen HDR-Playout* betrachtet und deshalb an dieser Stelle nicht diskutiert wird

gehend oder vollständig auf den Einsatz zusätzlicher Scheinwerfer verzichtet werden könnte¹¹. Die Ausstattung von Studios und EB-Teams mit lichttechnischem Gerät und der damit verbundene Wartungsaufwand und die nötige Lagerhaltung könnten so deutlich reduziert werden. Aufgrund der hohen Bilddynamik kann die Lichtsetzung innerhalb gewisser Grenzen virtuell in der Postproduktion geschehen. Dies kann jedoch nur einem technischen, kaum einem künstlerischen Anspruch gerecht werden¹². Für Außenproduktionen kann voraussichtlich sowohl der personelle Aufwand als auch der Transportaufwand deutlich gesenkt werden. Dies ist besonders im Falle einer Ausstrahlung in Standard-HDTV gegeben, da hier der gewünschte Ausschnitt aus der Gesamtdynamik des Kamerabilds in weiten Bereichen nachträglich fast beliebig angepasst werden kann.

Insgesamt ist im Broadcast im Zuge einer Umstellung auf HDR-Produktionen analog zu entsprechenden Entwicklungen in der Filmbranche mit einer zunehmenden Verlagerung der Arbeit in die Postproduktion zu rechnen.

2.3.2 Produktionsinfrastruktur

Wie bereits erwähnt zieht die Umstellung auf HDR-Produktionen erhöhte Datenübertragungsraten nach sich, was durch die Sicherstellung höherer Bandbreiten berücksichtigt werden muss. Es wurden bereits vielversprechende Versuche zur Reduktion der erforderlichen Kanalbandbreite für HDR-Bilder, etwa durch Chroma Subsampling [16], unternommen; eine Einschätzung der weiteren Entwicklungen ist derzeit jedoch noch nicht möglich.

Soll in Liveproduktionen gezielt mit HDR-Kamerasystemen für ein Standard-HDTV-Zielformat produziert werden, wäre auch die Integration des Tonemappingverfahrens schon im Kamerakopf mit Steuerung in Echtzeit über die Kamerakontrolle denkbar. Bei einer derartigen Hybridlösung könnte im gesamten verbleibenden Workflow weiterhin Standardequipment verwendet werden, da schon ab dem Kamerakopf nur noch Standard-HDTV-Bilddaten übertragen werden müssen und eine Integration der HDR-Daten im gesamten Workflow entfällt. Dazu müssten lediglich entsprechende Steuerdaten der CCU¹³ zum Kamerakopf hin und Informationen über Sensorsignalpegel zur Pegelbestimmung vor dem Mapping in die Bildkontrolle übertragen werden, wobei derartige Signale bei entsprechender Datenkompression nur relativ wenig Bandbreite benötigen würden.

Es bleibt abzuwarten, ob sich ein derartiges online-Tonemapping tatsächlich in der Praxis durchsetzen kann. Für die ersten Systeme wird voraussichtlich auf offline-Grading-Tools wie *Blackmagic DaVinci Resolve* oder *Adobe SpeedGrade* zurückgegriffen werden müssen, was jedoch einen Echtzeiteinsatz ausschließt.

Für Aufzeichnung, Distribution und eventuell Archivierung in einem HDR-Format steigen die zur Verfügung zu stellenden Datenraten und Kapazitäten von Speichermedien, allerdings fällt die Steigerung der Datenmenge durch eine Erhöhung der Quantisierung von 8 bit oder 10 bit

¹¹ Available-Light-Produktionen

¹² Es können nachträglich lediglich Helligkeit und Farbtemperatur modifiziert werden, eine Modifikation der Lichtrichtung ist nur teilweise durch Mapping der realen Szene in ein 3D-Modell mit anschließender virtueller Lichtsetzung und Rendering möglich, was für einen alltäglichen Einsatz im Broadcast deutlich zu aufwändig ist [14] [15].

¹³ Camera Control Unit

je Komponente gemäß *ITU-R BT.709-5* [17] auf 10 bit oder 12 bit je Komponente gemäß *ITU-R BT.2020* [1] weit weniger ins Gewicht, als die Steigerung der Datenmenge aufgrund der weit populäreren Forderung nach einer erhöhten Ortsauflösungen¹⁴.

2.3.3 Bildgestaltung

Über die Auswirkungen eines höheren Dynamikumfangs im Broadcast auf die Bildgestaltung können an dieser Stelle nur Vermutungen angestellt werden. Anhand der bisherigen Erfahrungen mit Änderungen an technischen Parametern des Fernsehbilds, etwa der Formatumstellung von 4:3 auf 16:9, ersten Erfahrungen mit 3D-TV oder den Erfahrungen aus der Bildgestaltung der Filmbranche lassen aber vermuten, dass die Verwendung von HDR-Bildformaten zu einer Variation der Gestaltungselemente führt. Diese Überlegung lässt sich beispielsweise an der potenziellen Ermüdung der Zuschauer bei häufigen Dynamiksprüngen, im Extremfall bis hin zu einer Blendwirkung bei einem Schnitt von einer längeren dunklen Szene auf eine grelle Tageslichtszene, illustrieren. In diesem Zusammenhang ist auch die Wahrnehmung von Farben für hohe und niedrige Helligkeiten und bei starken Kontrasten noch weiter zu untersuchen und gegebenenfalls zu berücksichtigen [18].

Bisher angewandte Techniken zur Bildgestaltung, die den geringen Dynamikumfang konventioneller Kamerasysteme beispielsweise durch eine gezielte Unterbelichtung von Teilen der Szenerie, vulgo "Absaufen lassen", gezielt nutzen, um diese Bereiche zu verbergen und den Eindruck von Tiefe zu erwecken, können bei einer Wiedergabe mit einem entsprechend hohen Kontrastumfang nicht mehr in dieser Form verwendet werden. Dies gilt auch für die eher selten angewandte Überbelichtung. Bei Verwendung konventioneller Optik werden bei HDR-Kamerasystemen vermutlich Lensflares und andere Objektivartefakte im Vergleich zu konventionellen HD-Kamerasystemen deutlich stärker sichtbar sein [19], was entweder technisch durch ein entsprechend optimiertes Optikdesign der Objektive reduziert werden oder als gestalterisches Element in die Bildgestaltung mit einfließen wird. Letztlich bietet der höhere Kontrastumfang besonders für Formate mit künstlerischem Anspruch wesentlich größere Freiräume zur Erzeugung eines bestimmten "Looks", also der gezielten Manipulation der Farbräume zur Erweckung eines visuellen Eindrucks.

2.3.4 Dokumentarische Formate

Besonders dokumentarische Formate könnten auf vielfältige Weise vom Einsatz von HDR-Kamerasystemen profitieren. Dabei kann nicht nur die Ausbeute an Bildmaterial durch die Vermeidung von Fehlbelichtungen in schwierigen Beleuchtungssituationen erhöht werden, durch weniger Eingriffe in die beobachtete Umgebung in Form von zusätzlicher Szenenausleuchtung kann der Beobachtereffekt deutlich reduziert werden. Dies gilt besonders für Produktionen wie Tierfilmen, bei denen mit konventionellen Kameras oft auf interessante Szenen verzichtet werden muss, da eine kontrollierte Ausleuchtung nicht möglich ist. Die

¹⁴Die Datenmenge nimmt bei einem Wechsel von 8 bit zu 12 bit bei gleichbleibender Ortsauflösung auf das 1,5-fache zu, eine Steigerung der Ortsauflösung von 1920x1080 px (HDTV) auf 7680x4320 px (8K UHD TV) führt bei gleichbleibender Quantisierung zur 16-fachen Datenmenge, jeweils immer für gleiche Framerates.

meist sehr hohen Kontraste natürlicher Szenen könnten mit HDR-Kamerasystemen adäquat wiedergegeben werden können.

Analog dazu kann der visuelle Eindruck der Lichtgestaltung in Theater, Oper und Musical, der maßgeblich auf extremen Kontrasten und gezieltem Einsatz verschiedener Farbtemperaturen beruht, nur mit HDR-Kamerasystemen realitätsgetreu aufgenommen werden.

Für Dokumentationen oder Berichterstattung in riskanten Situationen, etwa bei Umweltkatastrophen oder in der Kriegsberichterstattung, kann die Exposition durch eine höhere Flexibilität bezüglich plötzlicher Wechsel der Beleuchtungssituation und einer höheren Ausbeute des Bildmaterials deutlich reduziert werden.

2.4 Vorschlag für einen abwärtskompatiblen HDR-Playout

Eine Systemumstellung setzt bei Broadcastsystemen stets eine Übergangszeit voraus, in der ein abwärtskompatibles Signal gesendet wird, was sich sowohl bei der Umstellung von Schwarz-Weiß-Fernsehen zum Farbfernsehen als auch in jüngerer Zeit beim Umstieg von digitalen SD-Formaten zu HD-Formaten als grundsätzlich tauglich erwiesen hat. Für die Übertragung von HDR-Bewegtbild bietet sich grundsätzlich HEVC als Codec an. Allerdings ist diese sehr effiziente Möglichkeit zur Codierung technisch nicht zu den derzeit im Playout vorhandenen MPEG-2 und MPEG-4 Systemen kompatibel, weshalb für die Verwendung von HEVC¹⁵ insbesondere die Neuanschaffung entsprechender Endgeräte unvermeidlich ist [20]. Als mögliche Lösung für einen Übergangsbetrieb soll an dieser Stelle daher ein System ähnlich wie in [21] skizziert werden, welches eine zu HDTV abwärtskompatible Übertragung von HDR-Bewegtbild ermöglicht, ohne für die HDTV-Komponente zusätzliche Bandbreite zu belegen. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass das Mapping eines HDR-Signals in ein Standard-HDTV-Signal als verlustbehaftete Kompression durch Unterabtastung mit nichtlinearer Kennlinie, also als nichtlineare Quantisierung, interpretiert werden kann. Unter Berücksichtigung der Differenzdaten lässt sich bei Kenntnis über den Verlauf der Kennlinie das HDR-Bild wieder aus dem komprimierten Bild niedriger Dynamik rekonstruieren. Dabei kann ein HDTV-konformes Bildsignal übertragen werden; aus den Zusatzinformationen, die bei der Unterabtastung aus dem HDTV-Bild entfernt wurden, kann das HDR-Bildsignal gerendert werden. Zum Rendering des HDR-Bilds existieren verschiedene Ansätze [22], wobei die meisten derzeit existierenden Algorithmen nicht auf Bewegtbild mit zeitlich variablen Lichtverhältnissen optimiert sind; hier besteht noch Forschungsbedarf.

Dieses Verfahren könnte layerbasiert implementiert werden, wobei im Basislayer in einem konventionellen Playoutkanal das HDTV-Signal gesendet wird. Sämtliche zur Rekonstruktion des HDR-Bilddatenstroms notwendigen Informationen werden als zusätzliche Layer synchron in getrennten Kanälen übertragen, wobei die bisherige Playout- und Distributionsinfrastruktur gut genutzt werden kann. Geschieht die Ausstrahlung der Zusatzinformationen verschlüsselt, ist ein Pay-TV-Modell denkbar, bei dem kostenlos ein HDTV-Signal zur Verfügung gestellt wird und für zusätzliche Features wie HDR¹⁶ entweder zeitlich begrenzt oder dauerhaft ein

¹⁵High Efficiency Video Coding, auch H.265

¹⁶Entsprechende Überlegungen lassen sich auch für einen erweiterten Farbraum, eine höhere Ortsauflösung oder sogar für verschiedene Audioformate anstellen.

kryptographischer Schlüssel zur Decodierung des Zusatzsignals gekauft werden kann. Der Zahl verschiedener denkbarer Wirtschaftsmodelle sind hier kaum Grenzen gesetzt. Die Funktionsweise eines derartigen Systems lässt sich dem Pseudo-Blockschaltbild in Abbildung 1 entnehmen; wichtig ist dabei die Synchronität beider Signale.

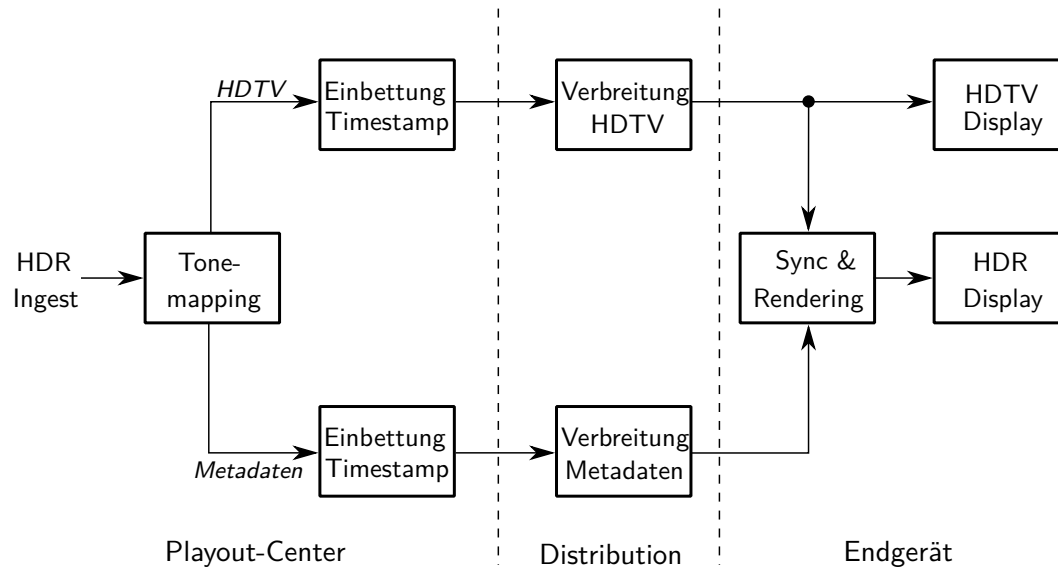


Abbildung 1: HDTV-Kompatible Übertragung von HDR-Bewegtbild

Unter der Annahme, dass dieses Verfahren nicht unerwünscht mit den Kompressionsverfahren der derzeitig vorherrschenden Distributionssysteme, namentlich MPEG-2 und MPEG-4 [23], interferiert, fällt bei diesem System nur die zu übertragende Datenmenge des HDR-Bildsignals an, in der das HDTV-Bild vollständig enthalten ist. [16] konnte nachweisen, dass sich das schon bisher verwendete Chroma-Subsampling gut auf HDR-Bilder anwenden lässt. Eine Implementierung dieses Verfahrens im hier vorgestellten Übergangsformat bleibt Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Bei der Rekonstruktion des HDR-Bilds können die Hersteller von HDR-Displays die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Systeme und der verbauten Technologie entsprechend berücksichtigen und beispielsweise in die Ansteuerung eines modulierten LED-Backlights mit einbeziehen [6].

Eine derartige Lösung würde eine stufenlose Formatumstellung ermöglichen, was durch vollständige Abwärtskompatibilität zu Altgeräten im Sinne der Sendeanstalten wäre. Durch den Anreiz zum Neukauf von HDR-Displays für eine höhere Bildqualität wäre diese Lösung ebenfalls im Sinne der Hersteller von Unterhaltungselektronik. Neugeräte könnten zusätzlich, sobald entsprechende Codecs verfügbar sind, zudem mit HEVC-Encodern ausgestattet werden, um weitgehend für die wichtigsten Weiterentwicklungen gewappnet zu sein.

3 CMOS-APS-Kamerasysteme

An dieser Stelle soll eine kurze Einführung in die wichtigsten Baugruppen von CMOS-APS-Kamerasystemen gegeben werden, um die Problematik der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Messtechnik herauszuarbeiten. Ein besonderes Augenmerk soll dabei auf der Darstellung einer Auswahl verschiedener Technologien zur Implementierung von CMOS-Bildsensoren gelegt werden. An dieser Stelle kann der Stand der Technik nicht vollständig dargestellt werden. Es soll vielmehr die Vielschichtigkeit der Thematik illustriert und die große Divergenz zwischen existierender und - zumindest teilweise - erforschter Technologie und den in der Praxis tatsächlich verwendbaren Baugruppen aufgezeigt werden.

Da im Rahmen dieser Arbeit die Physik und die technische Implementierung sowie gängige Herstellungsverfahren von Sensoren auf Basis von Photohalbleitern nur angerissen werden kann, sei schon an dieser Stelle auf [24], [25], [26], [27] und [28] sowie [29] als Literaturempfehlung verwiesen. Der Designprozess eines CMOS-APS-Bildsensors ist exemplarisch in [30] und [31] dargestellt.

In dieser Arbeit sollen, sofern nicht explizit anders erwähnt, ausschließlich Kamerasysteme basierend auf Active Pixel Bildsensoren in CMOS-Technologie, kurz CMOS-APS-Bildsensoren, betrachtet werden. Bei einem Active Pixel Bildsensor besitzt jedes Pixel eine eigene (oder in einigen Sonderbauformen zwei benachbarte Pixel zusammen) eine Verstärkerschaltung [28]. Sie haben die vom CCD-Sensor abgeleiteten Passive Pixel Bildsensoren, bei denen nur zeilen- oder spaltenweise Verstärker vorgesehen sind, heutzutage in der Praxis bis auf sehr wenige Sonderverwendungszwecke vollständig abgelöst.

Auch sollen in dieser Arbeit keine CCD-Bildsensoren betrachtet werden. Zwar werden auch diese immer noch weiterentwickelt [32], aufgrund der mittlerweile recht ausgereiften Technik ist bei diesen jedoch das Potential für technische Weiterentwicklungen und Verbesserungen nur noch sehr eingeschränkt gegeben. Im Gegensatz dazu ist für CMOS-Bildsensoren eine kontinuierliche Weiterentwicklung zu erwarten. Obwohl die heutzutage auf dem Markt erhältlichen CMOS-Bildsensoren in den meisten technischen Aspekten den CCD-Sensoren schon jetzt ebenbürtig oder sogar überlegen sind, werden, durch die technologischen Errungenschaften im Bereich der Implementierungen und der Herstellungsverfahren für CMOS-Halbleiter angetrieben, ständig Fortschritte in der technischen Umsetzung von CMOS-Bildsensoren erreicht. Einen nicht unerheblichen Anteil an dieser Entwicklung tragen More-than-Moore CMOS-Bildsensoren [33] bei, die über eine deutlich gesteigerte Integrationsdichte Zusatzfunktionen, teilweise schon pixelweise als hochintegriertes SOC¹⁷, ermöglichen. Dabei haben sie, trotz im (verglichen mit CCD-Sensoren) höherer Leistungsfähigkeit einen deutlich niedrigeren Gesamtenergieverbrauch, welcher zudem zu niedrigerer Chiptemperatur und infolgedessen zu einem besseren Rauschverhalten führt. Es ist zu erwarten, dass für Broadcast-Anwendungen schon bald die CCD-Bildsensoren gänzlich von CMOS-Bildsensoren abgelöst werden [34].

Die permanente Weiterentwicklung der CMOS-Bildsensoren zeigt sich auch an der steigenden Zahl der Publikationen zu neuen technischen Errungenschaften in diesem Bereich; an diese Stelle sei besonders auf die Publikationen zu CMOS-Bildsensoren im Rahmen der Proceedings

¹⁷System On Chip

der SPIE¹⁸ und der IEEE¹⁹ verwiesen, die einen recht guten Indikator für den aktuellen Stand der Forschung darstellen.

Im Folgenden soll nun zunächst das wohl wichtigste Bauteil in einem Kamerasystem betrachtet werden: der Bildsensor. Anschließend wird noch kurz auf die Rolle des Digital Signal Processing im Rahmen eines Kamerasystems eingegangen. Die Baugruppen zur Übertragung und Speicherung der Bilddaten und zur Steuerung können in dieser Arbeit aus Platzgründen nicht behandelt werden. Auch auf die Rolle der Objektive kann, obgleich sie einen erheblichen Einfluss auf die Bildqualität, insbesondere in Bezug auf High Dynamic Range Imaging, besitzen [35], im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden. An dieser Stelle sei dabei auf die Literatur verwiesen, wo sich Hinweise finden lassen, dass speziell bei High Dynamic Range Imaging die Verwendung besonders hochwertiger entspiegelter Optik [18] unabdingbar ist [36] [37]. Ghosting, das durch Reflexionen zwischen Sensor oder Sensordeckglas und Objektiv sowie zwischen den einzelnen Linsen und an den Wandungen des Objektivs oder an den Linsenrändern entsteht, kann nur in Ansätzen algorithmisch korrigiert werden [19]. Entsprechende Ansätze beziehen sich bisher allerdings lediglich auf die Korrektur von Standbild und lassen sich nur bedingt auf Bewegtbild übertragen.

3.1 Funktionsweise eines CMOS-APS-Bildsensors

Da die grundlegende Funktionsweise und ein Großteil der Details der technischen Umsetzung von Bildsensoren in der Literatur bereits ausführlich behandelt wurde [38], soll an dieser Stelle nur ein kurzer Abriss über die allgemeine Funktionsweise gegeben werden und eine kleine Auswahl relevanter und potentiell zukünftig relevanter Technologien für High Dynamic Range Imaging vorgestellt werden, die jeweils anhand der vorliegenden Literatur bezüglich ihrer Anwendbarkeit im Broadcast beurteilt werden. Wie bereits erwähnt sollen an dieser Stelle ausschließlich Active Pixel Bildsensoren betrachtet werden, da Passive Pixel Bildsensoren trotz ihres hohen Füllfaktors mittlerweile in der Praxis wegen ihres hohen Fixed Pattern Noise kaum mehr relevant sind. In Füllfaktor-kritischen Anwendungen, etwa bei sehr kleinen Pixelflächen, wurden sie weitgehend von BSI²⁰-Sensoren abgelöst [39]. Diese besitzen zwar einen Füllfaktor von annähernd 100 %, haben jedoch auch einen höheren optischen Crosstalk und sind zudem signifikant teurer als FSI²¹-Bildsensoren [40].

3.1.1 Aufbau eines Bildsensors

Ein CMOS-APS besteht aus einer in der Regel gleichmäßig verteilten²² Anordnung von aktiven Pixelzellen sowie einer Ansteuerlogik und einer Ausleseschaltung.

¹⁸ Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - <http://spie.org/>

¹⁹ Institute of Electrical and Electronics Engineers - <http://ieee.org/>

²⁰ Back Side Illumination, hierbei wird der Photodetektor als unterstes Element im Silizium implementiert, anschließend wird der Wafer herumgedreht und das überschüssige Silizium über dem Photodetektor durch Schleifen und Polieren abgetragen.

²¹ Front Side Illumination, die konventionelle Fertigungsweise von CMOS-Bildsensoren

²² Üblich ist eine schachbrettartige Anordnungen der Pixel, jedoch werden auch alternative Geometrien erforscht [28] [41]

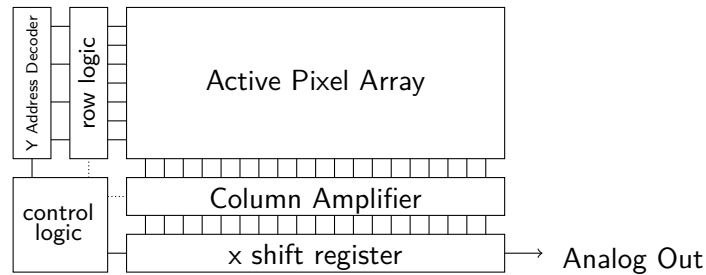


Abbildung 2: Prinzipschaltbild eines CMOS Active Pixel Sensors mit Analogausgang (frei nach [30])

In den meisten Fällen ist heutzutage direkt auf dem Sensor ein ADC integriert, meist ist dieser für eine höhere Auslesegeschwindigkeit durch partiell oder vollständig parallelen Readout spaltenweise oder blockweise implementiert [27] [30].

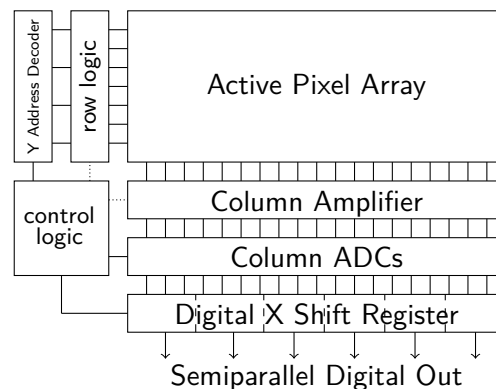


Abbildung 3: Prinzipschaltbild eines CMOS Active Pixel Sensors mit integriertem teilweise parallelem ADC (frei nach [30])

Ein pixelweiser ADC ist Gegenstand aktueller Entwicklungen [42], wird jedoch wegen seines derzeit noch sehr schlechten Füllfaktors nicht in der Praxis verwendet. Oft werden APS-CMOS-Bildsensoren nach der Anzahl der Transistoren pro Pixel beurteilt, da diese im direkten Zusammenhang einerseits zur im Füllfaktor begründeten Grundempfindlichkeit des Pixels steht, andererseits aber auch Rückschlüsse auf die zugrundeliegende Technologie zulässt. Die gängige Nomenklatur ist 3T, 5T, 8T usw. entsprechend 3, 5, 8 Transistoren pro Pixel. Mittlerweile sind Shared-Transistor-Pixel üblich, bei denen sich benachbarte Pixel einen oder mehrere Transistoren teilen, auf diese Weise können derzeit auch 1T, 1,5T, 1,75T und 2,5T Pixel zur Steigerung des Füllfaktors technisch umgesetzt werden [43]. Die heutzutage gängigste Bauform ist die 4T-Pixelzelle mit Pinned Photodiode als Photodetektor, die jedoch in der Regel als Shared-Transistor 1T- bis 2,5T-Pixel implementiert wird. Als technische Grundlage soll hier jedoch nur die Funktionsweise anhand der 3T-Pixelzelle als einfachste technische Implementierung betrachtet werden.

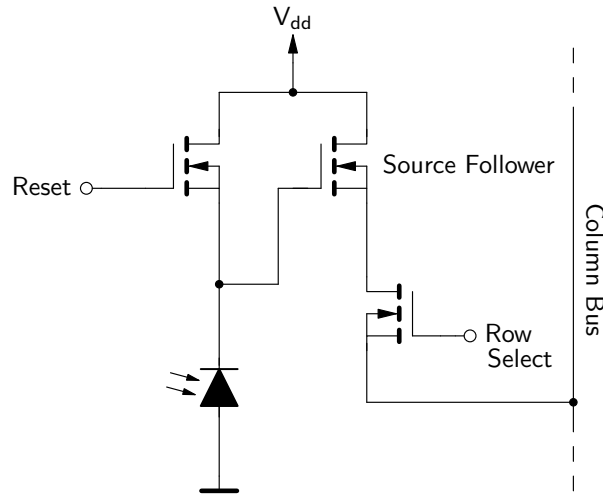


Abbildung 4: Prinzipschaltbild eines aktiven 3T - Pixels

Zu Beginn eines Belichtungszyklus wird die Kathode der Photodiode über den zu diesem Zeitpunkt durchgeschalteten Reset-Transistor auf V_{dd} gelegt, die Sperrschichtkapazität wird aufgeladen. Zu Beginn der Belichtungszeit sperrt der Reset-Transistor²³ und die Sperrschichtkapazität beginnt sich aufgrund des Inneren Photoelektrischen Effekts zu entladen.

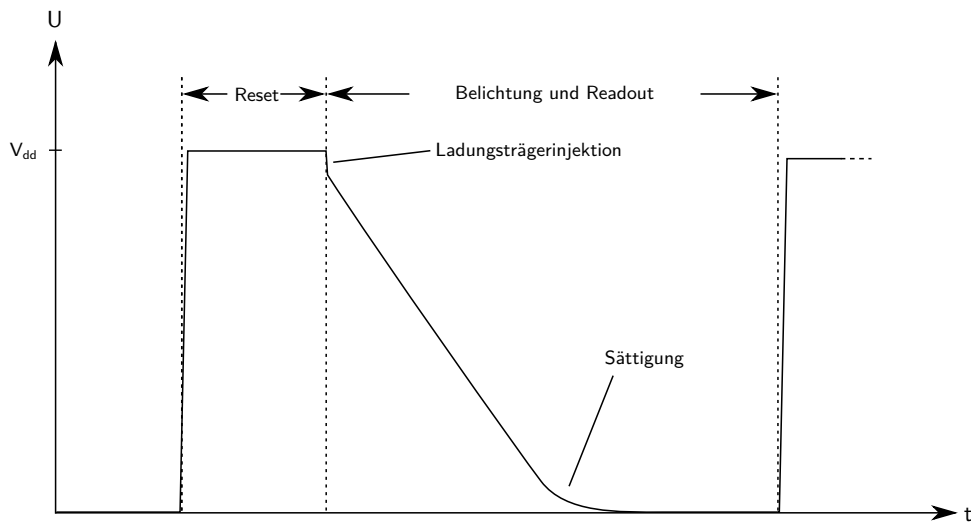


Abbildung 5: Verlauf der Kathodenspannung an der Photodiode eines überstrahlten APS-Bildsensors

²³Im Timing-Diagramm ist an dieser Stelle ein Einbruch der Kathodenspannung der Photodiode durch eine Ladungsträgerinjektion zu beobachten.

Die Spannung über der Photodiode sinkt dabei proportional zur einfallenden Lichtmenge, entsprechend dem Integral über Bestrahlungsstärke und Belichtungszeit. Diese Spannung wird im Sourcefollower verstärkt, dessen Ausgangsspannung bei aktivem Row-Select-Signal an den Column Bus angelegt und ausgelesen wird.

Bei 4T-Pixeln ist zwischen Photodiode und Sourcefollower zusätzlich noch ein Transfergate implementiert, das die Ladung der Photodiode vollständig in einem Floating-Diffusion-Node speichert und so als Sample-and-Hold-Stufe fungiert. Bei der heutzutage üblichen Ausführung der Photodiode als Pinned Photodiode kann deren Sperrschichtkapazität vollständig entladen werden, was zu einem stark reduzierten Reset-Noise führt. Die genaue Funktionsweise dieser Pixelarchitektur ist beispielsweise in [30] beschrieben, wo die Vor- und Nachteile dieses Pixeltyps für Rolling- und Global-Shutter-Bildsensoren ausführlich diskutiert werden.

3.1.2 Photodetektor

Die Menge des einfallenden Lichts muss in ein elektrisches Signal, also eine Spannung oder einen Strom, gewandelt werden. Dazu eignen sich in CMOS-Technik verschiedene optoelektrische Bauelemente. Im Folgenden sollen in Anlehnung an [28] die wichtigsten Bauformen vorgestellt werden. Anhand einer kurzen Diskussion soll dabei jeweils gezeigt werden, weshalb sich viele Implementierungsvarianten trotz neuer technologischen Möglichkeiten, die auf den ersten Blick oft scheinbar verlockende Vorteile besitzen, in der Praxis nicht oder nur für Spezialbildsensoren durchsetzen können.

PN-Photodioden

In der Praxis haben sich für CMOS-Bildsensoren vor allem PN-Photodioden²⁴ bewährt, da sie neben einem niedrigen Dunkelstrom und einer guten Linearität der Wandlungskennlinie einen guten Füllfaktor aufweisen [28]. Sie sind in Standard-CMOS-Fertigungsprozessen recht unproblematisch zu fertigen [27].

Die Kennlinie einer Photodiode weist im wesentlichen 2 Betriebsbereiche auf [44]. Für die Verwendung in Standard 3T-Pixeln werden sie normalerweise wegen der guten Linearität des Wandlungsverhaltens im sogenannten Photodioden-Modus beschaltet. Die Photodiode entlädt in der Belichtungs-Integrationszeit proportional zur eingefallenen Lichtmenge ihre eigene Sperrschichtkapazität, gemessen wird die dadurch verringerte Spannung, die im Source Follower verstärkt wird.

Der Solarzellen-Modus wird wegen des stark nichtlinearen Verhaltens, in der Kennlinie an der starken Kompression der Kurvenschar im Solarzellen-Modus zu erkennen, teilweise in modifizierter Beschaltung für Pixel mit einem logarithmischen Verhalten angewendet [45].

Die Funktionsweise von Photodioden durch den Inneren photoelektrischen Effekt ist in der Literatur detailliert erfasst, weshalb an dieser Stelle nur exemplarisch auf [24] verwiesen werden soll.

²⁴auch als PN-junction Photodiode bezeichnet

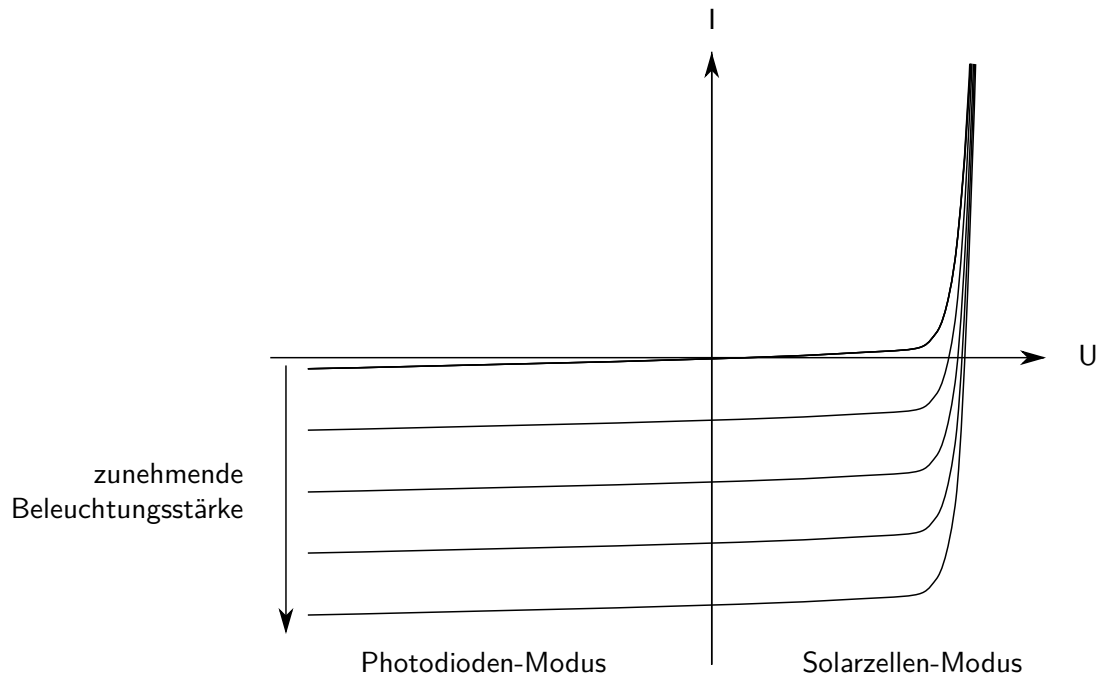


Abbildung 6: UI-Kennlinie einer PN-Photodiode

Pinned Photodiode

Die Pinned Photodiode ist eine Photodiode, die nicht wie die PN-Photodioden direkt an die Siliziumoberfläche angrenzend implementiert ist, sondern von dieser durch eine sehr dünne p^{++} -Epitaxieschicht getrennt ist, weshalb oft auch synonym die Bezeichnung *Buried Photodiode* verwendet wird.

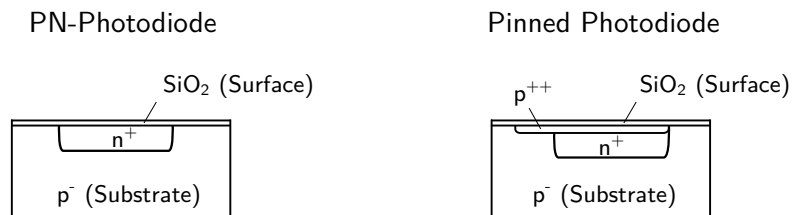


Abbildung 7: Aufbau einer PN-Photodiode und einer Pinned Photodiode

Dadurch wird das Surface Defect Noise verhindert, das bei PN-Photodioden aufgrund von Gitterdefekten an der Grenzfläche des Siliziums zum Siliziumdioxid der Waferoberfläche maßgeblich zum Dunkelstrom beiträgt. Der Dunkelstrom ist bei Pinned Photodioden daher etwa um den Faktor 100 kleiner als bei PN-Photodioden. Weiter besteht bei Pinned Photodioden

im Gegensatz zu PN-Photodioden die Möglichkeit eines vollständigen Ladungstransports beim Reset (complete depletion), wodurch das Reset-Noise, das erheblich zum Rauschen bei Pixeln mit PN-Photodioden beiträgt, eliminiert werden kann [33]. Die Spannung der Sperrschichtkapazität kann quasi auf eine definierte Spannung "festgenagelt" (engl. pinned) werden, was den Namen der Pinned Photodiode erklärt. Wird der Source-Follower-Transistor als Buried-Channel implementiert, so kann das Rauschen von Pixeln mit Pinned Photodioden beinahe vollständig auf das Niveau des Johnson-Rauschens²⁵ gesenkt werden [46]. CMOS-Bildsensoren mit Pinned Photodioden erreichen ein Rauschverhalten vergleichbar mit CCD-Sensoren, die bislang in diesem Aspekt als Goldstandard betrachtet wurden. Pixel mit Pinned Photodioden stellen daher bei CMOS-Bildsensoren derzeit den aktuellen Stand der Technik dar [47]. Um beim Reset einen vollständigen Ladungsabfluss zu gewährleisten sind allerdings nur Pixel mit einem Pitch unter 8 µm technisch umsetzbar, weshalb sie nicht für High-Speed-Anwendungen oder andere Anwendungen, bei denen eine maximale Lichtempfindlichkeit im Vordergrund steht, verwendet werden können[27].

Avalanche-Photodioden

Avalanche-Photodioden nutzen den Lawinendurchbruch zur internen Verstärkung einzelner durch Photonen herausgeschlagener Elektronen²⁶. Sie erreichen dadurch ein sehr steiflankiges Wandlungsverhalten mit einer hohen Verstärkung [42]. In der Praxis manifestiert sich dies in einer hohen Lichtempfindlichkeit und einer sehr schnellen Reaktion. Sie benötigen für ihren Betrieb eine für Halbleiter verhältnismäßig hohe Betriebsspannung, meist im Bereich einiger 10 bis 100 V, was die Implementierung in Standard-CMOS-Technologie verhindert [28]. Weiter sind Avalanche-Photodioden für einen Betrieb im sehr niedrigen Helligkeitsbereich²⁷ ausgelegt, was zu einem sehr niedrigen Signal-Rauschabstand durch ein verhältnismäßig sehr starkes Photon Shot Noise führt. [48] schlägt eine Sonderform eines Arrays von Avalanche-Photodioden vor. Durch die Kombination des Geiger-Modus mit einem alternierenden Betrieb als Standard-PN-Photodioden könnte auf diese Weise ein extrem lowlight-empfindlicher HDR-Sensor implementiert werden. Dieser ist jedoch noch weit von einer Einsetzbarkeit in der Praxis entfernt; so beträgt etwa der Pixelpitch noch 27 µm x 27 µm. Durch die Fertigung als Backside Illuminated Sensor auf einem Saphir-Wafer lässt sich einerseits zwar ein Füllfaktor von annähernd 100 % erreichen, andererseits wird der Sensor dadurch aber verhältnismäßig teuer in der Herstellung. Bildsensoren auf Basis von Avalanche-Photodioden²⁸ sind primär für wissenschaftliche Anwendungszwecke, etwa für Time-Of-Flight-Sensoren [49] oder die Einzelphotonendetektion in Szintillatordetektoren, interessant, spielen aber für Broadcastanwendungen durch den sehr niedrigen Signal-Rauschabstand keine nennenswerte Rolle.

²⁵Weißes Rauschen durch die thermische Bewegung der Ladungsträger, das maßgeblich zur physikalisch bedingten Untergrenze des Rauschens in einem Halbleiter beiträgt

²⁶Innerer Photoelektrischer Effekt, analog zur PN-Photodiode

²⁷im sog. Geiger-Modus findet eine Einzelphotonendetektion statt, jedoch führen schon sehr wenige Photonen zu einer völligen Sättigung der Photodiode

²⁸Meist als Single-Photon Avalanche Diode (SPAD)-Bildsensoren bezeichnet

Photogates

Photogates werden in erster Linie in Frame-Transfer-CCD-Bildsensoren verwendet. Bei den heutigen CMOS-Bildsensoren spielen sie keine wichtige Rolle²⁹. Dies ist im Aufbau der Photogates begründet, bei denen die Gate-Strukturen aus Polysilizium gefertigt werden. Das führt einerseits zwar zu einem sehr geringen Surface Defect Noise, absorbiert andererseits aber besonders kurze Wellenlängen stark, was zu einer unregelmäßigen Spektralempfindlichkeit (stark reduzierte Empfindlichkeit des Sensors für kurze Wellenlängen) führt. Zudem besitzen Photogates ein schlechteres Wandlerverhalten als bipolaren Phototransistoren, da der Gate-Kanal aus geometrischen Gründen nur einen geringen Wirkungsquerschnitt besitzt [27]. In einigen experimentellen Bildsensoren wurden Photogates dennoch in 4T-Sensoren verwendet, um hybride Lösungen zwischen CCD- und CMOS-Sensoren zu erforschen, allerdings hatten diese Sensoren in der Regel einen eher schlechten Füllfaktor [28]. Sie wurden weitgehend von Pixeln mit Pinned Photodiode abgelöst.

Phototransistoren

Phototransistoren werden für Bildsensoren nur sehr selten verwendet, da die fertigungsbedingte hohe Streuung der Stromverstärkung der Transistoren [44] zu einem erheblichen Fixed Pattern Noise führt und sich durch den Einsatz eines Phototransistors gegenüber etwa einer PN-Photodiode für Standard-Sensoren kaum schaltungstechnische Vorteile ergeben. Sie werden nur in einigen Spezialbildsensoren verwendet, bei denen die, wenn auch geringe, Signalverstärkung ausgenutzt wird [28].

Photoleitende Detektoren

Photoleitende Detektoren sind als MSM³⁰-Strukturen aufgebaut und werden fast ausschließlich für Spezialbildsensoren für Röntgen-, oder Ultraviolett³¹-Bildsensoren verwendet. Sie besitzen aufgrund eines großen Dunkelstroms ein relativ hohes Dunkelrauschen. Da sie zudem wegen des im Vergleich zur PN-Photodiode weniger stark ausgeprägten Feldes meist längere Ansprechzeiten als die bisher vorgestellten Photodetektoren besitzen, sind sie für Bildsensoren im sichtbaren Spektralbereich eher ungeeignet [27] und an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

3.1.3 Electronic Shutter

Ein wichtiges Detail der Implementierung eines CMOS-Bildsensors ist die des Elektronischen Shutters, also der Belichtungssteuerung. Es wird dabei generell zwischen Rolling Shutter und Global Shutter differenziert, die sich in der Ansteuerung und Implementierung grundsätzlich unterscheiden.

²⁹Die ersten Active Pixel Sensoren verwendeten jedoch Photogates, da diese aus den CCD-Sensoren bekannt und ihre technische Implementierung bereits erforscht waren.

³⁰Metal-Semiconductor-Metal, im Aufbau den Schottky-Halbleitern sehr ähnlich

³¹In diesem Fall ist jedoch das Halbleitermaterial in der Regel nicht Silizium, sondern Galliumnitrid.

Rolling Shutter

Bei der technologisch einfacher zu implementierenden Variante des Rolling Shutter wird das Bild zeilenweise belichtet und ausgelesen. Da die Belichtung jeder Bildzeile kurz nach der vorherigen Zeile beginnt und auch kurz nach ihr mit ihrem Readout endet, 'rollt' quasi ein Signal zur Signalisierung des Belichtungsbeginns, gefolgt von einem Auslesesignal von oben nach unten durch den Sensor. Der zeitliche Abstand dieser Signale bestimmt die Belichtungszeit. Bei sehr kurzen Lichtimpulsen, etwa Blitzen, wird daher nur ein Teil des Sensorbildes belichtet, während der Rest des Bildes dunkel bleibt. Bei schnell bewegten Objekten verschiebt sich im Laufe der Belichtung der Zeilen des Bildes der Ort der besagten Objekte, was zu unerwünschten Artefakten im Bild führt. Ob diese Artefakte eine Einschränkung darstellen ist stark anwendungsabhängig und muss im Einzelfall bei der Wahl des Sensors berücksichtigt werden. Dabei ist jedoch auch zu beachten, dass Bildsensoren mit Rolling Shutter oft einen höheren Füllfaktor als Bildsensoren mit Global Shutter besitzen, was grundsätzlich zu einer höheren Grundempfindlichkeit führt [50].

Global Shutter

Bei der Implementierung als Global Shutter werden alle Zeilen des Bilds gleichzeitig belichtet, die Signale der Photodetektoren nach Ende der Belichtungszeit in eine Sample-and-Hold-Stufe verschoben und das Bild anschließend zeilenweise ausgelesen. Anschließend wird der Sensor global zurückgesetzt und wieder ein gesamtes Bild neu erfasst. Die hierfür notwendige Sample-and-Hold-Stufe lässt sich mit ein bis zwei zusätzliche Transistoren pro Pixel umsetzen, was jedoch den Füllfaktor verringert. Weiter kann die parasitäre Kapazität der zusätzlichen Transistoren die Empfindlichkeit des Pixels und sein Zeitverhalten verschlechtern [27]. Kann die Ladung des Photodetektors nicht vollständig in die Sample-and-Hold-Stufe überführt werden, führt dies zu einem störenden Image Lag, hierfür sind besonders 4T-Pixelzellen anfällig, die jedoch wiederum gegenüber 5T-Zellen einen besseren Füllfaktor aufweisen, letztlich sind hier jeweils Vor- und Nachteile der Pixellayouts gegeneinander abzuwägen. Durch Designoptimierung kann Image Lag jedoch auch bei 4T-Pixelzellen weitgehend verhindert werden [51]. Ein wesentlicher Nachteil der Global-Shutter-Architekturen mit 4T- und 5T-Pixeln ist, dass kein Correlated Double Sampling zur Rauschreduktion verwendet werden kann [31].

Electronic Shutter im Broadcast

Bei Kameras für Broadcastanwendungen besteht dabei meist der Wunsch oder sogar die Anforderung nach Verwendung eines Bildsensors mit Global Shutter [52], um potentiellen Artefakten bei Blitzlichtern in Pressekonferenzen oder bei Aufnahmen mit schnell bewegten Objekten vorzubeugen.

3.1.4 Füllfaktor

Der Füllfaktor bezeichnet im Falle der Bildsensoren den Anteil der Fläche des Photodetektors an der Gesamtfläche eines Pixels [53], und wird üblicherweise in % angegeben.

$$FF[\%] = \frac{A_{Photodetektor}}{A_{GesamtesPixel}} \cdot 100\%$$

Da die Lichtempfindlichkeit eines Bildsensors neben der Wahl der verwendeten Sensortechnologie maßgeblich vom Füllfaktor beeinflusst wird, stellt dieser eine sehr wichtige Kenngröße bei der Bewertung verschiedener Sensortechnologien dar, wobei allgemein meist eine hohe Grundempfindlichkeit und damit eine große Fläche des Photosensors als erstrebenswert gilt. Da bei heutigen Sensoren jedoch bei vorgegebener Sensorgröße die Auflösung immer weiter steigt und entsprechend die Größe der einzelnen Pixel immer weiter sinkt, spielt der Füllfaktor der Pixel eine elementare Rolle [54].

Der Füllfaktor wird durch zusätzliche Bauteile und Metal Layer, die die Leiterbahnen und lichtundurchlässige Bauteilabdeckungen auf einem Bildsensor bilden, verringert [50]. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit insofern von Bedeutung, dass viele Sensortechnologien im Zusammenhang mit HDR auf einem Einsatz zusätzlicher Bauelemente basieren, was eine deutliche Reduktion des Füllfaktors zur Folge hat. Dies ist, wie bereits erwähnt, in Verbindung mit der Reduktion der Pixelfläche zum Erreichen größerer Ortsauflösungen problematisch.

Um den Füllfaktor zu optimieren kann beispielsweise die Flächenausnutzung der Photodetektors optimiert werden, etwa durch eine günstigere Geometrie, wodurch eventuell sogar der Pixelcrosstalk reduziert werden kann [55]. Eine weitere gängige Technik für eine Erhöhung des Füllfaktors ist der Einsatz von Microlenses [41], die mittlerweile als Standard-Prozessschritt in der Sensorfertigung integriert ist.

3.2 Erzeugung farbiger Bilder

An dieser Stelle sollen nur Technologien zur Erzeugung farbiger Bilder betrachtet werden, die sich zur Bewegtbilderfassung eignen. Multi-Shot-Sensoren mit Filterrad und die Verwendung von Monochromsensoren bei strukturierter Beleuchtung werden daher an dieser Stelle vernachlässigt.

3.2.1 3-Chip-Kamera

Bei 3-Chip-Kameras wird eine optische Prismenkonstruktion zur Trennung der Farbauszüge verwendet, welche dann auf 3 separate Bildsensoren ausgespiegelt werden. Sie werden auch heute noch vereinzelt im Broadcast verwendet, beispielsweise in einigen HD-Camcordern und Produktionskameras der Hersteller SONY, Panasonic und Grass Valley. Bei dieser Art der Farbtrennung entstehen keine Farbsaum-Artefakte wie bei Sensoren mit Color-Filter-Array; als Farbraum steht für jeden Punkt im Ausgangsbild die volle Farbinformation (4:4:4) zur Verfügung. Wegen der Verwendung dichroitischer Filter auf dem Prisma überlappen sich die getrennten Wellenlängenbänder nur recht schmalbandig, was zu einer guten Farbtrennung führt. Aufgrund des Aufbaus mittels eines dichroitischen Prismas ergeben sich sehr geringere optische Verluste [56], was sich positiv auf die Lichtempfindlichkeit auswirkt.

Diesen Vorteilen stehen jedoch einige Nachteile gegenüber, etwa die Notwendigkeit der Verwendung von 3 Sensoren gegenüber einem einzelnen Sensor bei den gängigen Alternativverfahren. Die relativ teure Präzisionsoptik des Strahlteilerblocks muss mit nur wenigen μm Toleranz (etwa die Hälfte des Pixel-Pitchs) einjustiert werden, um auf allen 3 Bildsensoren ein deckungsgleiches Bild zu erzeugen. Da sich die Optik bei starken mechanischen Belastungen (Schlag, Stoß) und bei Hitze auch wieder dejustieren kann, wird diese Technologie bei Kameraneuentwicklungen fast nur noch für Studiokameras in Erwägung gezogen [34], bei denen keine starken mechanischen Belastungen zu erwarten sind. Das durch die Optik hervorgerufene höhere Gewicht spielt bei dieser Anwendung eine untergeordnete Rolle, da es durch Pedestals kompensiert wird. Unter Umständen ist es erwünscht, da die höhere Massenträgheit das Bild mechanisch stabilisiert. Weiter benötigen 3-Chip-Kameras wegen des durch den Strahlteiler bedingten hohen Aufwandes speziell konstruierte Objektive; Standard-Photo- oder Cineobjektive können hier nicht verwendet werden. Das von einigen Herstellern angeführte Argument der höheren Auflösung des Farbraums ist insofern für Broadcastanwendungen zu relativieren, als die hohe Redundanz der Bilddaten in der Regel bei anschließender Videokompression wieder bestmöglich reduziert wird [57] [58]. Die immer weiter verbesserten Demosaicking-Algorithmen bei Sensoren mit Color-Filter-Array ermöglichen bei nur 1,5-2 fach größeren Sensoren [57] eine dennoch vergleichbare oder sogar bessere Auflösung und MTF³². Sowohl bei HD-Kameras [59] als auch bei Ultra HD-Kameras [60] sind 3-Chip-Kameras immer seltener anzutreffen.

3.2.2 Color-Filter-Array

Kameras mit Color-Filter-Arrays sind heutzutage weit verbreitet. Die häufigste Form eines Color-Filter-Arrays ist das Bayer-Filter oder auch Bayer-Pattern, benannt nach seinem Erfinder Bryce Bayer. In der Patentschrift ist die mosaikförmige Anordnung der Farbfilter beschrieben, die 50 % der Fläche mit grünen, und je 25 % der Fläche mit roten und blauen Farbfiltern abdecken [61]. Die Verteilung ist in der V_λ -Kurve³³ des menschlichen Auges begründet, die eine erhöhte Empfindlichkeit für gelbgrünes bis grünes Licht beschreibt [18]. Die Farbfilter werden in der Regel auf Polymerbasis [57] gefertigt und verhalten sich als spektral relativ breitbandige Bandpässe mit geringer Flankensteilheit, was für eine gute Farbtrennung eher ungünstig ist. Künftig ist jedoch auch die Verwendung nanostrukturierter Metall-Strukturen zur Implementierung fast beliebig steilflankiger Bandpässe denkbar [62] [63]. Da die Farbtrennung in beiden Fällen in erster Linie auf Absorption beruht, ist jedoch die Grundempfindlichkeit von Sensoren mit Color-Filter-Array prinzipbedingt etwas schlechter als bei 3-Chip-Kameras.

Die Benennung derartiger zusammengehöriger Pixelcluster ist dabei in der Literatur nicht immer konsistent. Je nach Betrachtungsweise setzt sich daher ein Metapixel entweder aus zwei Pixeln mit grünen Filtern, einem Pixel mit einem roten und einem Pixel mit einem blauen Filter zusammen, oder ein Pixel setzt sich aus Subpixeln mit den entsprechenden Farbfiltern zusammen. Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden werden im Folgenden im Zusammenhang

³²Modulation Transfer Function, Modulationsübertragungsfunktion

³³Hellempfindlichkeitskurve, beschreibt die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei photopischem Sehen (Tagsehen)

mit Color-Filter-Arrays die Bezeichnungen Subpixel als einzelne elementare Pixelzelle, bestehend aus Photodetektor inklusive der dazugehörigen Verstärkerschaltung und Metapixel für ein Cluster zusammengehöriger Subpixel verwendet werden. Die fehlende Konsistenz der Bezeichnung in der Literatur und in den Datenblättern von Bildsensoren ist insofern von Bedeutung, dass bei Verwendung eines Color-Filter-Arrays mit n Filtern die tatsächliche Ortsauflösung eines Bildsensors (Zahl der Metapixel) nur die n^{-1} -fache Zahl der Subpixel beträgt. In den Datenblättern ist in der Regel jedoch die Zahl der Subpixel angegeben.

Dieser Auflösungsverlust kann weitgehend durch Interpolation virtueller Subpixelwerte aus dem tatsächlichen Helligkeitswert an der betrachteten Stelle und den Helligkeiten der benachbarten Metapixel ausgeglichen werden, sodass am Ende der Signalverarbeitungskette wieder ein Bild mit der Auflösung gegeben durch die Zahl der Subpixel ausgegeben wird. An dieser Stelle sei auf das Kapitel *Demosaicking* verwiesen, wo die sich daraus ergebende Problematik kurz diskutiert wird. Ein in der Praxis störender Effekt ist das Übersprechen benachbarter Pixel, meist als *Crosstalk* bezeichnet. Dieser Effekt tritt auf, da im Normalbetrieb das Licht nicht als paralleles Strahlenbündel orthogonal zur Sensoroberfläche auftrifft und sich das Licht nach dem Auftreffen nicht orthogonal zur Oberfläche ausbreitet, da es in den Farbfiltern oder in der Passivierungsschicht über dem Silizium des Sensors gebrochen wird³⁴ [64]. Im idealisierten Fall würde das durch einen bestimmten Farbfilter fallende Licht vom zugehörigen Photodetektor erfasst werden. In der Praxis ist der Verlauf der Lichtstrahlen jedoch nicht orthogonal zur Sensoroberfläche, sodass ein Teil des Lichts, das durch einen bestimmten Farbfilter fällt, auch vom Photodetektor eines benachbarten Subpixels erfasst wird. Dies wird durch die verhältnismäßig große Entfernung der Farbfilter auf der Sensoroberfläche zu den Photodetektoren begünstigt [65]. Weiter tragen die Breitbandigkeit der Farbfilter³⁵ und die Diffusion der durch den inneren Photoeffekt erzeugten Ladungsträger in die Strukturen eines benachbarten Subpixels³⁶ zum Phänomen des Crosstalks bei.

Crosstalk führt zu Farbfehlern, da Helligkeitsinformationen und Farbinformationen einander falsch zugeordnet werden. Durch eine Optimierung der Geometrie der Pixel [55] und der Microlenses [66] kann der Crosstalk zwar nicht verhindert, aber zumindest reduziert werden; eine weitere Reduktion des Effekts wird durch eine algorithmische Korrektur erreicht [67].

Alternative Color-Filter-Arrays, etwa mit pseudozufälliger Verteilung der Farbfilter [68], Filter mit alternativen Anordnungen der Subpixelfilter [69], Komplementärfarbfilter [70] oder die Verwendung eines panchromatischen Filters an Stelle des zweiten Grünfilters in einem Metapixel [32] sind nicht nur Gegenstand der Forschung, sondern werden zum Teil auch schon eingesetzt. Derartige Color-Filter-Arrays werden in der Regel in Hinblick auf eine höhere Lichtempfindlichkeit des Sensors, eine bessere Farbwiedergabe durch optimierte Rekonstruktionsalgorithmen oder sogar eine bessere MTF [71] entwickelt und optimiert. Da die dafür benötigten Rekonstruktionsalgorithmen jedoch deutlich komplexer als bei der Verwendung eines Bayerpatterns sind, hat sich letzteres für die meisten Anwendungen durchgesetzt.

³⁴In der Literatur als *Optical Spatial Crosstalk* bezeichnet

³⁵In der Literatur als *Spectral Crosstalk* bezeichnet

³⁶In der Literatur als *Electrical Crosstalk* bezeichnet

3.2.3 Auf wellenlängenabhängiger Absorptionstiefe beruhende Sensoren

Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle noch auf wellenlängenabhängiger Absorption basierende Sensoren aufgeführt werden. Die Funktion dieser Sensoren ist im Phänomen begründet, dass kurzwelliges Licht in Silizium eine geringere Eindringtiefe als langwelliges Licht besitzt. Bei diesem Sensortyp werden mehrere Photodetektoren, üblicherweise drei Photodioden, übereinander gebaut, sodass im untersten Detektor nur noch rotes, im mittleren Detektor rotes und grünes und im obersten Detektor Licht aller Wellenlängen absorbiert wird. Aus den resultierenden Signalen kann dann für jedes Pixel ein RGB-Wert berechnet werden. Theoretisch erreicht ein auf dieser Technologie basierender Sensor einen nativen 4:4:4-Farbraum, der algorithmisch korrigiert sogar den Gamut einer 3-Chip-Kamera übersteigt. Diese theoretische Auflösung wird jedoch in der Praxis nicht erreicht, da zwischen den einzelnen Detektoren eines Pixels ein recht starker optischer und elektrischer Crosstalk, auch lateral, zu beobachten ist, der zudem eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts abhängt. Weiter zeigen auf dieser Technologie basierende Sensoren ein starkes Farbrauschen und für bestimmte Farben eine schlechte Farbwiedergabe [56]. Diese Effekte lassen sich algorithmisch kaum korrigieren. Bei dunklen Bildern ist ein starkes Rauschen, besonders im Rotkanal, und eine starke Farbraumdrift zu beobachten [72].

[73] berichtet bei einem ähnlichen Bildsensorprototyp zudem von weiteren unerwünschten Nebeneffekten, etwa einer vom äußeren Magnetfeld abhängigen Farbtrennung aufgrund des Halleffekts im Halbleiter. Dabei verstärkt sich aufgrund der Trajektorie der sich im Halbleiter bewegenden Elektronen der laterale Crosstalk je nach Ausprägung des Magnetfelds signifikant, besonders bei Beleuchtung des Sensors mit langwelligem Licht.

Einer der wenigen auf diesem Prinzip basierenden und in der Praxis tatsächlich eingesetzten Sensoren ist der Foveon X3-Sensor [74]. Die Technologie ist jedoch für viele Anwendungen noch nicht ausreichend ausgereift und die Problematik des Sensorfarbraums, der sich nur schlecht in die gängigen Farbräume umwandeln lässt, haben eine weite Verbreitung bisher verhindert. Experimentell existieren Ansätze zur Kombination mit anderen Technologien, etwa die Verbindung mit Dünnschichttechnik [75] oder die Kombination mit einem modifizierten Color-Filter-Array [76]; entsprechende Bildsensoren sind jedoch noch weit von einem Einsatz in der Praxis entfernt. Eine verwandte Technologie im Zusammenhang mit HDR-Bildsensoren wird im Kapitel *Bildsensoren mit Stacked Photodiode Pixel* diskutiert.

3.3 DSP

In Kamerasystemen, insbesondere auch bei Kamerasystemen für Broadcastanwendungen, besitzt die DSP³⁷-Stufe einen wesentlichen Anteil an der erreichbaren Bildqualität eines Kamerasystems. In diesem Schritt der Signalkette werden viele Sensorartefakte, etwa die bei CMOS-Bildsensoren besonders stark auftretenden Gain- und Offsetfehler, aber auch Rauschen, Linearitäts- und Farbraumfehler weitgehend korrigiert. Dies geschieht in der Regel, ohne dass der Anwender etwas davon erfährt; selbst bei Rohdatenformaten ("RAW-Images") werden derartige Korrekturen, zumindest teilweise, angewendet, bevor die Signale das Kamerasystem verlassen oder aufgezeichnet werden. Dies ist im Broadcastbereich in erster Linie

³⁷Digital Signal Processing

darin begründet, dass vom Anwender ein visuell möglichst optimales Bild und keine exakte Repräsentation der Daten am Ausgang des Bildsensors im Sinne einer messtechnischen Erfassung von Sensorgrößen, wie etwa bei Kamerasystemen für industrielle Messzwecke, gewünscht ist. Für die messtechnische Beurteilung und Vergleichbarkeit von Kamerasystemen für Broadcastzwecke stellt dies jedoch eine nicht unerhebliche Hürde dar, da die verwendeten Korrekturalgorithmen in modernen Kameras oft szenenadaptiv, also abhängig vom Bildinhalt arbeiten. Ihre genaue Funktionsweise und die Details ihrer Implementierung zählen üblicherweise als eine der wichtigsten IP³⁸s der Hersteller von Kamerasystemen zu deren bestgehüteten Geheimnissen. Dies erschwert in Kombination mit der großen Vielfalt an möglichen Implementierungen der Algorithmen die Schaffung universeller Testumgebungen und -szenarien, in denen ein objektiver Vergleich mehrerer Systeme stattfinden kann.

An dieser Stelle kann aufgrund der Komplexität des Themas keine vollständige Betrachtung aller Möglichkeiten im Rahmen einer DSP für Bewegtbildkameras geleistet werden, jedoch soll ein kurzer Überblick über die Thematik die Relevanz dieses Schrittes demonstrieren und zugleich gegenüber der Problematik einer messtechnischen Vergleichbarkeit von derart vorprozessierten Daten sensibilisieren.

3.3.1 Übersicht über die Komponenten der DSP-Pipeline einer CMOS-Kamera

Die einzelnen Schritte in der Signalverarbeitung sind in Form einer, an dieser Stelle stark verallgemeinerten, DSP-Pipeline in einem Kamerasystem für Broadcastanwendungen nach [77], [78] und [79] in Abbildung 8 dargestellt.

Der Vollständigkeit halber wurden der Bildsensor als Signalquelle sowie der ADC³⁹ als wichtiges kennlinienbeeinflussendes Bauteil und die Ausgabe oder Speicherung der Bilddaten als Signalsenke in das Blockschaltbild mit aufgenommen. Einige Blöcke im dargestellten Signalfluss sind optional, wegen ihrer weiten Verbreitung in modernen Kamerasystemen für Broadcastanwendungen wurden sie jedoch in die Abbildung aufgenommen. So sind beispielsweise Crosstalkreduktion [29] [80], Defektpixelerkennung und -interpolation [81] [82], verschiedene Entrauschungsalgorithmen in den diversen Farbräumen [83] [84] [85] [86] sowie γ -Korrektur und Grading [78] [87] recht weit verbreitet, aber nicht zwingend notwendig. Eventuell kann auch, besonders bei Kompaktkamcordern mit integriertem Objektiv, schon im Kamerasystem die Korrektur der chromatischen und sphärischen Aberrationen vorgenommen werden. Diese basieren auf Polynomen, meist 7-ten bis 20-ten Grades [79]. Die zur Korrektur nötigen Daten über die Werte von Brennweite, Schärfe und Blende können über eine Datenverbindung konstant an die DSP-Einheit übermittelt oder im Datenstrom als Metadaten gespeichert werden. Da idealerweise die Verzerrungen aller Komponenten bekannt sind oder zuvor aus dem Optikdesign errechnet wurden, kann eine Umkehrfunktion des Modells als Korrektur auf die Bilddaten angewendet werden [88].

Im Fall von HDR-Kamerasystemen kann es mitunter notwendig sein, die entsprechenden Algorithmen zum Teil deutlich zu modifizieren. Dies gilt besonders für die Schritte der Gain-Offset-Korrektur sowie für die Modifikationen der Übertragungskennlinie und Farbraumkorrekturen. Weiter können hier noch zusätzliche Rekonstruktionsalgorithmen oder Mapping-

³⁸ Intellectual Property

³⁹ Analog to Digital Converter

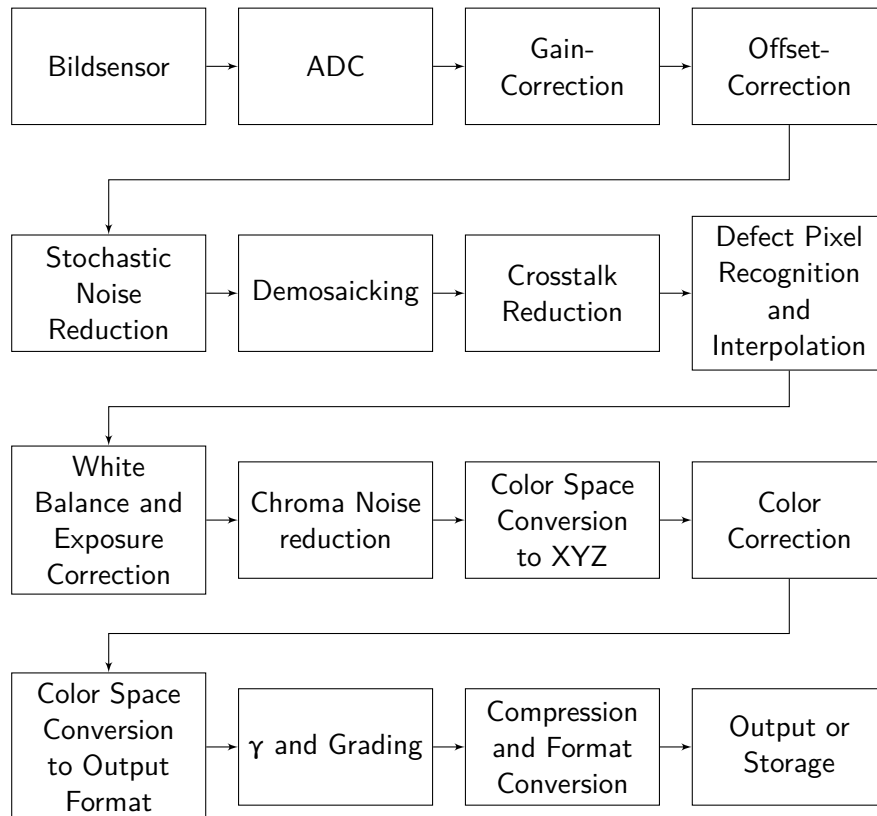


Abbildung 8: DSP-Pipeline

Schritte notwendig sein, um den Dynamikumfang des Bildsensors auf die Ausgabeschnittstelle zu reduzieren.

3.3.2 Korrekturen

Im Rahmen der digitalen Signalverarbeitung werden verschiedene Korrekturen zur Bildverbesserung und zur Reduktion von Sensorartefakten vorgenommen. Diese Korrekturen tragen erheblich zur Bildqualität bei, da in vielen Fällen durch eine günstige Wahl der Algorithmen sowie ihrer Abfolge in der Signalverarbeitungskette unerwünschte Eigenschaften und prinzipbedingte Schwächen der Bildsensoren weitgehend ausgeglichen werden können. Als Beispiel sei hierfür die Gain- und Offsetkorrektur angeführt, die oft in einem Schritt als GO-Korrektur zusammengefasst [78] wird.

Bei der Implementierung ist zu beachten, dass die Algorithmen bei ausreichender Effizienz keine zu hohe Komplexität aufweisen dürfen, da die Rechenleistung der verwendeten Bausteine relativ begrenzt ist und da im Broadcast meist eine Ausgabe der Daten in Echtzeit bei geringst möglicher Latenz gefordert wird. Aus diesem Grund wird meist auch eine Priorisierung der Korrekturen vorgenommen; so sind eine Korrektur der Gain- und Offset-

fehler⁴⁰ eines CMOS-Bildsensors unabdingbar [31]. Algorithmen zur Crosstalkreduktion sind nicht zwingend notwendig, können aber die Bildqualität erheblich verbessern [29]. Komplexe Demosaickingverfahren im Falle einer gewünschten besonders hohen Bildqualität bei postproduktionslastigen Formaten, etwa beim Film, und Manipulationen der Farbräume, die oft noch im Rahmen künstlerischer Bearbeitung vorgenommen werden, können auch offline, etwa im Rahmen des Ingests, Schnitts oder der Postproduktion auf leistungsfähigen Computern vorgenommen werden.

3.3.3 Demosaicking

Da die Implementierung des Demosaicking⁴¹ bei Kamerasystemen mit einem Sensor mit Color-Filter-Array einen erheblichen Einfluss auf die Bildqualität hat, soll an dieser Stelle kurz auf diesen Aspekt eingegangen werden. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass in diesem Verarbeitungsschritt im Grunde eine Unterabtastung des Sensorbildes algorithmisch ausgeglichen beziehungsweise das Ausgangsbild rekonstruiert werden soll [53]. An dieser Stelle kann nur ein Überblick über dieses sehr komplexe Thema gegeben werden. Zudem bleibt zu bedenken, dass auch dieser Teil der Signalkette einen wichtigen Bestandteil der Intellectual Property bei der Entwicklung von Kamerasystemen darstellt, weshalb die Quellenlage trotz einer großen Anzahl an Publikationen keine vollständige Darstellung des Stands der Technik zulässt.

Besagte Unterabtastung äußert sich im Farbbild in Farbsäumen und Aliasing-Artefakten, besonders bei hohen Ortsfrequenzen und an Kanten. Sie fällt bei einfachen Algorithmen wie einer bilinearen Interpolation, teilweise kombiniert mit einer Gewichtung, störend auf.

Komplexere Algorithmen berücksichtigen den Verlauf von Kanten im Bild und können derartige Artefakte stark reduzieren; sie sind jedoch meist deutlich komplexer und skalieren ungünstig zur Bildgröße [89], was sich in erhöhter Rechenzeit und erhöhtem Speicherverbrauch niederschlägt. Als recht brauchbarer Überblick über die gängigsten Verfahren sei an dieser Stelle [90] genannt. Ansätze zum kantenerhaltenden Demosaicking auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze [91], konnten sich in der Praxis aufgrund der verhältnismäßig aufwändigen Implementierung bisher kaum durchsetzen. Weiter kann im Rahmen des Demosaicking in vielen Fällen bereits eine Crosstalk-Korrektur vorgenommen werden, was im Idealfall eine Vereinfachung der Signalverarbeitungskette und damit eine Optimierung der Implementierung zur Folge hat.

Es ist zu erwarten, dass die bisher bekannten Algorithmen bei HDR-Kamerasystemen aufgrund der höheren Dynamikauflösung angepasst werden müssen. Dies ist einerseits in der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges begründet, die nichtlinear zur Bildhelligkeit verläuft [18]; andererseits hat eine höhere Bilddynamik auch ein höheres Luminanz- und Chroma-Rauschen zur Folge, was entsprechend berücksichtigt werden muss. Unter Umständen kann es sogar nötig werden, die gesamte Signal-Processing-Pipeline zu modifizieren [92].

⁴⁰oft auch als Fixed Pattern Noise bezeichnet

⁴¹auch als Color-Filter-Array-Interpolation oder Farbrekonstruktion bezeichnet. Da die verbreitetste Form des Color-Filter-Array das Bayer-Pattern ist, wird häufig der Begriff "Debayering" synonym verwendet.

3.3.4 Implementierung

Die Signalverarbeitung ist bei Kamerasystemen für Broadcastanwendungen wegen des sehr schlechten Füllfaktors in der Regel nicht als On-Sensor-DSP [93] [94] implementiert. Die Berechnung erfolgt in der Regel auf einem dedizierten DSP⁴² oder FPGA⁴³. Besonders die Implementierung auf einem FPGA bringt dabei einen erheblichen Entwicklungsaufwand mit sich. Sie ermöglicht eine sehr effiziente Implementierung vieler Algorithmen[95]. Dabei ist eine Abwägung zwischen Implementierungsaufwand, Rekonfigurierbarkeit, Zeitaufwand der Berechnung und weiteren Faktoren wie Energieverbrauch und der für den Betrieb der verschiedenen Komponenten notwendigen Peripherie zu treffen [96]. Bei Kamerasystemen für Broadcastanwendungen ist dabei besonders der Energieverbrauch ein wichtiger Gesichtspunkt.

Die Kompression am Ende der Signalverarbeitungskette wird in der Regel in einen ASIC⁴⁴ ausgelagert, da dieser auf niedrigen Energieverbrauch bei gleichzeitig maximaler Performance optimiert ist [97]. Sie kann jedoch auch als Soft- oder Hard-IP-Core auf einem FPGA implementiert werden [98].

⁴²hier: *Digital Signal Processor*

⁴³*Field-Programmable Gate Array*

⁴⁴*Application-Specific Integrated Circuit*

4 Übersicht über Technologien zur Erzeugung von HDR-Bewegt看

In diesem Kapitel soll vor dem Hintergrund des gegebenen Einblicks in die Bestandteile eines Kamerasystems eine Auswahl an Technologien vorgestellt werden, die sich zur Aufnahme von HDR-Bewegt看 eignen. Es wird an dieser Stelle ausdrücklich kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, da eine vollständige Auflistung des Stands der Technik den Rahmen dieser Arbeit erheblich sprengen würde. Es sollen dabei in erster Linie Verfahren betrachtet werden, die immer wieder in der Literatur im Zusammenhang mit der Aufnahme von Bewegt看 genannt werden, obwohl sie teilweise dafür nur eingeschränkt geeignet sind [36] [99]. Verfahren, die sich nur für die Aufnahme von HDR-Standbild, etwa durch Fusion der Einzelbilder einer Belichtungsreihe, eignen, sollen daher an dieser Stelle nicht betrachtet werden; sie sind ohnehin für Broadcastanwendungen nicht geeignet.

4.1 Multikamerasysteme

Aufbauten mit Multikamerasystemen nutzen ein Render-Verfahren, um die Bilder mehrerer Standardkameras zu einem HDR-Bild zu fusionieren. Dabei stellt sich in der Produktionsfinanzierung oft die Frage der Wirtschaftlichkeit, da das Kosten-Nutzen-Verhältniss verhältnismäßig ungünstig ist. So müssen im Falle der Verwendung eines Aufbaus mit Strahlteiler zwei Kameras, im Falle der Verwendung einer Lichtfeldkamera sogar eine erheblich größere Zahl an Kameras⁴⁵, sowie eine entsprechende Infrastruktur zur Stromversorgung, Kamerasteuerung und Übertragung der Bilddaten zur Verfügung gestellt werden. Die Aufbauten sind nicht nur groß und schwer, sondern auch mechanisch sehr empfindlich, sodass ein Einsatz im Produktionsbetrieb mit erheblichen Einschränkungen bezüglich Flexibilität in der Kamerapositionierung und -bedienung und erheblichem Justageaufwand verbunden ist, der neben den hohen Anschaffungskosten auch erhebliche Personalkosten verursacht.

4.1.1 Aufbau mit Strahlteiler

Im Zusammenhang mit Multikamerasystemen zur Aufnahme von HDR-Bewegt看 sind in erster Linie Aufbauten mit Strahlteilern zu nennen. In der Praxis wird als Aufbau meist ein leicht modifiziertes Spiegelrig verwendet. Spiegelrigs sind aus dem Kontext stereoskopischer Produktionen bereits bekannt und haben sich weitgehend im Einsatz bewährt. Im Falle des Einsatzes zur Aufnahme von HDR-Bewegt看 werden die Kameras dabei jedoch im Gegensatz zum Einsatz in stereoskopischen Produktionen auf maximale Kongruenz der Bilder einjustiert. Die Kameras werden so konfiguriert, dass sie jeweils einen bestimmten Helligkeitsbereich aufnehmen, wobei sich beide Bereiche möglichst nur schmalbandig überlappen. Aus diesem insgesamt gespreizten Dynamikbereich der Aufnahme lässt sich algorithmisch ein HDR-Bild rekonstruieren. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich in [100]. Das Verfahren eignet sich zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Bilder. [100] nennt jedoch etliche Einschränkungen, die einen Einsatz dieses Verfahrens im Broadcast-Alltag für eine

⁴⁵Gängig sind Aufbauten mit 16 Kameras.

große Zahl an Anwendungen ausschließt. Dazu zählen das hohe Gewicht des Aufbaus, Streulicht- und Lens-Flare-Probleme, Geisterbilder, Polarisationsartefakte⁴⁶ und ein insgesamt für bestimmte Szenen immer noch zu geringer Dynamikumfang. Weiter ist zu vermuten, dass der im Broadcast verbreitete Einsatz von Zoomobjektiven erhebliche Gleichlaufprobleme bezüglich der Brennweiten und in geringerem Maße bezüglich der Schärfenebene zur Folge hat; im Motorcontroller müsste eine entsprechende Korrektur zum Ausgleich herstellungsbedingter Toleranzen vorgesehen werden.

4.1.2 Lichtfeldkamera

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz einer Lichtfeldkamera, auch als Plenoptische Kamera bezeichnet. Eine derartige Kamera besteht aus einem Array von Einzelkameras oder kann als bauliche Variante als Einzelkamera mit einem Bildsensor mit integrierter Mikrooptik [101] ausgeführt sein. Aus dem mit einer derartigen Kamera aufgenommenen Lichtfeld lässt sich ein HDR-Bild rekonstruieren [102]. Dazu werden im Falle des Kameraarrays die einzelnen Kameras derart konfiguriert, dass sie unterschiedliche Empfindlichkeiten aufweisen, was im Rekonstruktionsalgorithmus zur Steigerung des Dynamikumfangs genutzt werden kann. Auch bei der Rekonstruktion von Bildern einer Single-Sensor-Plenoptischen Kamera ist eine Steigerung der Bilddynamik möglich, allerdings nur in deutlich geringerem Umfang [103]. Um aus einem Lichtfeld eine zweidimensionale Bildrepräsentation zu rendern, müssen vergleichsweise aufwändige Berechnungen betrieben werden. Dies impliziert aber auch die Verarbeitung einer etwa um den Faktor 20 größeren Datenmenge gegenüber konventionellen Verfahren. Auch die Systeme zur Korrektur von Bildfehlern fallen deutlich umfangreicher aus als bei konventionellen Kameras [104]. Dies stellt für Echtzeitsysteme ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar, besonders da im Broadcast die Forderung nach höheren Bildwiederholraten im Raum steht.

Da derzeit keine Bildsensoren für Single-Sensor-Plenoptische Kameras existieren, die im rekonstruierten Bild auch nur näherungsweise die Ortsauflösung der gängigen HD-Formate erreichen, bleibt für Broadcast- oder Cine-Anwendungen nur die Verwendung eines Kameraarrays. Soll nur eine Erhöhung des Dynamikumfangs erreicht werden, ohne dass zusätzlich die erweiterten gestalterischen Möglichkeiten der Lichtfeldbildgebung [105] genutzt werden, ergibt sich daraus ein sehr ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Zusammenfassend sind Lichtfeldkameras derzeit noch als Gegenstand der Forschung zu betrachten und werden im Bereich der Cine- und Broadcastproduktion vermutlich erst in einigen Jahren Marktreife erreichen.

4.2 Bildsensoren mit Lateral-Overflow-Capacitor-Pixeln

Bei dieser Technologie wird die Full-Well-Kapazität der Pixel durch zusätzliche Kondensatoren im Halbleitersubstrat erweitert [106]. Auf diese Weise lassen sich relativ hohe Dynamikumfänge abbilden, allerdings weisen Sensoren dieser Bauart bedingt durch einen niedrigen

⁴⁶Der Strahlteiler besitzt für polarisiertes Licht ein anderes Teilverhältnis als für unpolarisiertes Licht. Dieser Effekt wirkt sich in Form einer Farbraumdrift und in Form lokaler Helligkeitsvariationen bei spiegelnden Reflektionen in der Szene aus.

Füllfaktor eine geringe Grundempfindlichkeit auf [27], sodass für praxistaugliche Sensoren ein sehr großer Pixelpitch verwendet werden müsste. [107] nennt einer Fläche von $20 \times 20 \mu\text{m}$. Für einen Full-HD-Sensor mit einer Auflösung von 1920×1080 ergäbe sich somit eine Sensorgröße von $38,4 \times 21,6 \text{ mm}$. Dies ist deutlich größer als ein Normalfilm-Academy 35 mm-Film⁴⁷. Konventionelle 2/3-Inch-Objektive für Broadcast sind für derartige Sensorgrößen ungeeignet, da sie nur für Sensorgrößen bis zu $9,6 \times 5,4 \text{ mm}$, entsprechend einer Bilddiagonale von 11 mm, entwickelt wurden [108]; selbst teure 35 mm-Objektive wären ungeeignet [109]. Bei der Forderung von 2k-, 4k- oder gar 8k-Sensoren [60] lässt sich dieser Gedankengang entsprechend übertragen. Die Pixel in [106] sind mit $7,5 \times 7,5 \mu\text{m}$ zwar deutlich kleiner, im Vergleich zu modernen Standard-Bildsensoren aber immer noch sehr groß. Ein Full-HD-Sensor wäre damit knapp doppelt so groß wie ein Standard 2/3-Inch Bildsensor.

[31] nennt als technologische Variante die Implementierung mittels eines Dual Transfer Gate, wobei die Implementierung als 6T-Pixel mit einem Füllfaktor von 56,4 % bei einer Pixelgröße von $4,8 \times 4,8 \mu\text{m}$ deutlich tauglicher für den Einsatz in Broadcastanwendungen erscheint. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass die Ergebnisse der Simulationen in der vorgestellten Arbeit nur eine Dynamik von 84,5 dB gegenüber über 100 dB in [106] und [107] aufweist. Weiter ist zu vermuten, dass durch den pseudosequenziellen Readout Bewegungsartefakte, in erster Linie Motion Blur, entstehen.

4.3 Bildsensoren mit nichtlinearer Kennlinie

Durch verschiedene schaltungstechnische Varianten [110] kann erreicht werden, dass die OECF von CMOS-Bildsensoren nichtlinear verläuft⁴⁸. Die gängigsten Varianten derartiger Bildsensoren besitzen eine Kennlinie, die entweder vollständig logarithmisch⁴⁹ oder abschnittsweise logarithmisch⁵⁰ verläuft. Dies kann genutzt werden, um einen höheren Dynamikumfang auf einem bestimmten Ausgangsspannungsbereich abzubilden, weshalb derartige Bildsensoren auch als *Comanding Image Sensor* bezeichnet werden [27]. Sie besitzen für niedrige Helligkeiten eine schlechte Auflösung der Dynamikstufen, was für viele Anwendungen sehr ungünstig ist. Zudem weisen sie meist ein hohes Fixed Pattern Noise auf, das stark mit der Temperatur des Sensors driftet [27].

Bei den üblichen Schaltungsvarianten liegt am Pixelausgang kontinuierlich eine Spannung an, die sich logarithmisch zur Beleuchtungsstärke verhält. Es gibt keinen Reset wie bei Standard-CMOS-Bildsensoren [37] und daher auch keine dedizierte Belichtungszeit; ein Global Shutter ist bei der Standard-Implementierung nicht möglich. Da die Reaktionszeit der Pixel sich linear zum Photostrom verhält [112], tritt, besonders beim Wechsel von starker zu schwacher Beleuchtung, ein starker Image Lag in der Größenordnung einiger 100 ms auf, was in etwa dem Verhalten von Röhrenkameras mit Vidikons entspricht. Weiter ist das SNR derartiger

⁴⁷Dieser besitzt eine Fläche von $22 \times 16 \text{ mm}$ [108].

⁴⁸Davon zu unterscheiden ist die Kompression einer linearen Bildsensorkennlinie in der Signalverarbeitung [111].

⁴⁹Auch als Log-Bildsensoren bezeichnet.

⁵⁰Wegen des abschnittsweise linearen und abschnittsweise logarithmischen Kennlinienverlaufs auch als LinLog-Bildsensoren bezeichnet.

Sensoren relativ niedrig, oft um die 40 dB; dies ist vor allem im starkem Dunkelrauschen begründet [112].

Eine alternative Implementierung beruht auf der Verwendung einer PN-Photodiode im Solarzellen-Modus [45]. In diesem Fall kann eine recht gute Unterdrückung des Fixed Pattern Noise und ein stark reduzierter Image Lag erreicht werden. Allerdings hat der vorgestellte Sensor einen Füllfaktor von nur 30 %.

4.4 Bildsensoren mit Stacked Photodiode Pixel

[72] schlägt einen Sensor aufgebaut aus zwei Photodiodenschichten vor. Da die untere Photodiode aufgrund der Lichtabsorption in der oberen Schicht mit einer geringeren Lichtintensität belichtet wird, lässt sich in Kombination ein höherer Dynamikumfang abdecken. In besagter Publikation wird die spektrale Empfindlichkeit der beiden Photodioden nicht explizit genannt. Aufgrund eines ähnlichen zugrundeliegenden Aufbaus wie bei Bildsensoren, deren Farbtrennung auf wellenlängenabhängiger Absorptionstiefe beruht, ist anzunehmen, dass die Spektralempfindlichkeit der beiden Photodioden jedoch nicht identisch ist. Zudem ergeben sich im Falle eines Color-Filter-Arrays zur Erfassung der Farbinformationen ungleichmäßige Crosstalks für die verschiedenen Pixeltypen in Bezug auf unterschiedliche Wellenlängen des einfallenden Lichts, was in einer Verschiebung der Farbmetrik resultiert. Weiter wird aufgrund eines zusätzlich benötigten MOS-Transistors der Füllfaktor weiter verringert.

Aus diesem Grund scheint der vorgestellte Sensor zum derzeitigen Stand der Technik für die Verwendung in Kamerasystemen für Broadcastanwendungen eher ungeeignet zu sein.

4.5 Bildsensoren mit Non-Regular Sampling

Aus dem Signal eines Bildsensors, dessen Pixel unterschiedliche Empfindlichkeiten aufweisen, lässt sich algorithmisch ein HDR-Bild rekonstruieren [113] [114]. Die Variation der Pixelempfindlichkeit wurde in den genannten Quellen durch eine Maske mit pixelweise variierten ND-Filtern, ähnlich einem Color-Filter-Array mit pseudozufälliger Anordnung, jedoch mit Graufiltern anstelle von Farbfiltren, erreicht. In der Massenfertigung könnten die ND-Filter jedoch auch in den Metallmasken des Bildsensors integriert werden [115]. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass es keine Bewegungsartefakte verursacht und dass die bestehenden und hinreichend erforschten Standard-Sensorarchitekturen nur minimal verändert werden müssten. Die Kosten für einen derartigen Sensor wären daher vergleichbar mit Standard-CMOS-Bildsensoren. Nachteilig an diesem Verfahren ist der verhältnismäßig große Rechenaufwand bei der Rekonstruktion des HDR-Bildes aus den Sensordaten; zudem führt das Subsampling zu einer Auflösungsverringering, die sich nicht vollständig algorithmisch kompensieren lässt. Es bleibt abzuwarten, ob sich Kamerasysteme auf diesem Funktionsprinzip in Zukunft durchsetzen können.

Auf einem ähnlichen Verfahren beruht die Verwendung von Metapixeln bestehend aus Subpixeln unterschiedlicher Fläche [116]. Allerdings besitzen derartige Bildsensoren eine ungünstige MTF, die sich abschnittsweise stark nichtlinear und nichtmonoton verhält. In der Praxis führt dies zu Aliasing-Effekten.

4.6 Bildsensoren mit Mehrfachbelichtung

Als Variante der Bildsensoren mit Non-Regular Sampling kann die Menge der gesammelten Ladung auch bei einem Sensor mit gleich empfindlichen Pixeln durch die Kombination mehrerer Einzelbelichtungen entsprechend einem teilweisen oder vollständigen Readout nach einem Teil der Belichtungszeit mit anschließender Kombination der Ladung, üblicherweise an einem Floating Diffusion Node [117], variiert werden. Dadurch kann eine Steigerung des Dynamikumfangs erreicht werden. In der Literatur wird eine Vielzahl von Verfahren auf Basis dieser Funktionsweise unter dem Begriff *Exposure Bracketing* zusammengefasst. Die vorgestellten Verfahren unterscheiden sich dabei zum Teil stark in der technischen Implementierung sowie bezüglich der Variation der Belichtungszeiten der Teilbelichtungen. Als größter Nachteil des Verfahrens gelten Bewegungsartefakte und Motion Blur, sofern nicht eine Highspeed-Architektur mit sehr kurzen Belichtungszeiten verwendet wird [31]. Dabei wird jedoch der visuelle Eindruck eines konventionellen Kamerabildes stark verändert. Der Ansatz des digitalen ND-Filters, der gewissermaßen eine Variante des Verfahrens darstellt, könnte jedoch Abhilfe schaffen. Weiter besitzen die meisten Verfahren zur Mehrfachbelichtung einen kleinen Signal-Rauschabstand, besonders bei dunklen Motiven[64].

Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle als weitere technische Variante noch Odd-Even-Bildsensoren genannt werden, bei denen jeweils alle geradzahligen Zeilen und alle ungeradzahligen Zeilen unterschiedliche Belichtungszeiten aufweisen und im Readout oder virtuell per DSP in der Nachverarbeitung kombiniert werden. Sie werden wegen der derzeit nur wenig zufriedenstellenden Rekonstruktionsalgorithmen⁵¹ nur für Spezialanwendungen verwendet, sind aber im Handel erhältlich.

Sensoren mit Mehrfachbelichtung sind für Bewegtbildanwendungen eher ungeeignet, da sich Bewegungsartefakte nur recht aufwändig rekonstruieren lassen.

4.7 Bildsensoren mit Digitalem ND-Filter

In [118] wird ein Ansatz zur Einstellung der Empfindlichkeit eines Kamerasystems vorgestellt, der auf einer Modifikation des Readoutvorganges beruht. Dabei wird die gesamte Belichtungszeit in Teilabschnitte unterteilt, die anschließend zu einem Ergebnisbild gerendert werden. Dem Verfahren der Bildsensoren mit Mehrfachbelichtung sehr ähnlich könnte dieses Verfahren mit geringen Modifikationen auch zur Aufnahme von HDR-Bewegtbild verwendet werden [28] [119]. Auch dieses Verfahren benötigt jedoch eine relativ hohe Grundhelligkeit. Weiter müssen auch hier für eine Anwendung des Funktionsprinzips bei Bewegtbildaufnahmen sowohl der Bildsensor als auch die gesamte Readoutschaltung für die dadurch erhöhten Bildwiederholraten ausgelegt sein. Im Broadcast würde dies sehr kurze Belichtungszeiten und hohe Framerates bedeuten. Dies ist jedoch wenig praktikabel, da die benötigte Highspeedfähigkeit der Kamerakomponenten die Kosten erheblich in die Höhe treiben würde. Weiter wäre eine vergleichsweise starke Ausleuchtung des Drehorts nötig, was bei vielen potentiellen Anwendungsbereichen von HDR-Kamerasystemen nicht ohne Weiteres möglich ist.

⁵¹Um Bewegungsartefakte zu reduzieren können Motion-Prediction-Algorithmen verwendet werden; derzeit funktionieren diese jedoch nur bei sehr einfachen Szenen und langsamen bis moderaten Bewegungen.

4.8 Multi-Readout-Bildsensoren

Multi-Readout-Bildsensoren basieren auf einer parallelen Verarbeitung des Sensorsignals, das vor den ADCs mit unterschiedlichen Faktoren vorverstärkt wird [120] [112]. Es wird dabei das Signal des hoch verstärkten Kanals am Ausgang angelegt, bis die Kennlinie ihren Sättigungspunkt erreicht hat. Danach wird auf den geringer verstärkten Kanal umgeschaltet. Eventuelle Unregelmäßigkeiten am Übergang zwischen den Kennlinien der beiden Kanäle können durch Interpolation algorithmisch ausgeglichen werden [121].

Eine Erweiterung dieses Verfahrens wird in [121] beschrieben. Dort wird der Dynamikumfang durch eine kontrollierte Ableitung von Teilladungen aus der Photodiode während des Belichtungsvorgangs nochmals deutlich gesteigert, und somit die Full-Well-Kapazität virtuell erhöht wird. Diese Teilladungen werden jedoch im Gegensatz zu [122] nicht in Form eines partiellen Resets verworfen, sondern ausgelesen und können so zur Rekonstruktion eines HDR-Bilds verwendet werden.

[99] nennt für die erreichbare Dynamik von Multi-Readout-Bildsensoren primär das Dunkelrauschen als limitierenden Faktor, wobei dieses schon zum derzeitigen Stand der Technik für 4T-APS Bildsensoren mit Pinned Photodiode als Photodetektor auf sehr niedrige Werte gesenkt werden kann [123].

Der im Rahmen dieser Arbeit zu vermessende Bildsensor beruht auf dem Multi-Readout-Prinzip. Er kann bezüglich der Verstärkungsfaktoren der beiden bei ihm vorhandenen Kanäle, in dieser Arbeit als Highgain- und Lowgainkanal bezeichnet, konfiguriert werden. Weiter kann entweder über eine entsprechende Sensorkonfiguration gewählt werden, ob pixelweise automatisch zwischen dem hoch und dem niedrig verstärkten Auslesekanal umgeschaltet werden soll, oder ob permanent nur einer der beiden Kanäle ausgelesen werden soll.

4.9 Rekonstruktion aus unterschiedlicher Absorption der Filter eines Color-Filter-Arrays

Einen interessanten Ansatz verfolgt [124]. Dort wird ein ähnliches Prinzip wie bei Bildsensoren mit Non-Regular-Sampling vorgeschlagen, wobei in diesem Fall keine dedizierten ND-Filter und auch kein pseudo-zufälliges Verteilungsmuster genutzt werden, sondern die unter den verschiedenen Farben insgesamt unterschiedliche optische Transmission der Polymerfilter eines Standard-Color-Filter-Arrays handelsüblicher Farb-CMOS-Singleshotkameras genutzt wird. Dieses Verfahren kann in bestehenden Kamerasystemen implementiert werden, ohne dass spezielle Hardware nötig ist. Allerdings ist die erreichbare Steigerung der Dynamik recht begrenzt und zudem vom Bildinhalt abhängig. Weiter lässt sich der Algorithmus nur auf Rohdaten anwenden; nach dem Demosaicking lässt sich das Verfahren nicht mehr anwenden. Es bleibt zu untersuchen, ob sich dieses Verfahren beispielsweise mit Multi-Readout-Bildsensoren verbinden lässt, um den Dynamikumfang derartiger Sensoren noch weiter zu steigern.

4.10 Bildsensoren mit Licht-Frequenz-Wandlern

In [27] werden für die HDR-Bildgebung auch Sensoren mit Pixeln genannt, an deren Ausgang ein Digitalsignal mit einer zur Lichtintensität proportionalen Frequenz anliegt. Derartige

Bildsensoren sind prinzipiell leicht digital auslesbar, besitzen aber ein ungünstiges Rauschverhalten, da das Fixed Pattern Noise hier im Gegensatz zu konventionellen Sensoren nicht additiv sondern multiplikativ zum Gesamtrauschen des Bildsensors beiträgt. Weitere Eigenschaften derartiger Sensoren werden ausführlich in [64] diskutiert; eine weitere Variante wird in [42] vorgeschlagen. Bislang sind nur Prototypen von CMOS-Bildsensor mit Licht-Frequenz-Wandlern bekannt, da derzeit der Pixelpitch zu groß für die praktische Anwendung ist. Durch Transistorsharing lassen sich theoretisch Pixel mit einem Pitch von 7 bis 8 μm erreichen, dabei lassen sich allerdings prinzipbedingt nur niedrige Framerates erreichen [64].

4.11 Gradientenkamera

Nach [125] wäre theoretisch die numerische Rekonstruktion eines HDR-Bildes aus einem Gradientenbild mit normalem Dynamikumfang möglich. Dazu wird allerdings ein spezieller Bildsensor benötigt, der noch nicht auf dem Markt angeboten wird, weshalb das Verfahren keine praktische Relevanz besitzt.

5 Messtechnische Erfassung von HDR-Kamerasystemen

Wie bereits im Kapitel *CMOS-APS-Kamerasysteme* dargestellt existiert eine große Zahl an verschiedenen Verfahren zur Erfassung von HDR-Bewegt看. Im Rahmen dieses Kapitels soll eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung und Charakterisierung derartiger Kamerasysteme gegeben werden und die Anwendbarkeit auf Labormessungen und Messungen im Broadcastbetrieb diskutiert werden. Anschließend soll ein Verfahren zur Erfassung der OECF⁵² vorgestellt werden, das im Rahmen dieser Arbeit am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS entwickelt wurde.

Es können an dieser Stelle nur Verfahren zur quantitativen Analyse von Kamerasystemen vorgestellt werden; für Verfahren zur subjektiven Beurteilung von Bildqualität sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Recommendations der Arbeitsgruppe *Broadcast Service (Television)* des *Radiocommunication Sector* der ITU⁵³ [126] [127] sowie auf [128] verwiesen.

5.1 Zielsetzung

Am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen wird derzeit das HDR-Kamerasystem *HiDiV* entwickelt, das durch Verwendung eines neuartigen sCMOS-Bildsensors in der Lage ist, im Singleshotverfahren Bewegtbilder mit einer Dynamik von bis zu 90 dB aufzunehmen. Im Rahmen der Erprobung und der Forschung an diesem Kamerasystem wurde, wie bereits in der Einleitung des Kapitels erwähnt, ein Messverfahren zur präzisen Vermessung der OECF des überdurchschnittlich lichtempfindlichen High-Gain-Auslesekanals des Bildsensors entwickelt, um eine lineare Kennlinie im gesamten Betriebsbereich gewährleisten zu können. Eventuelle Abweichungen oder Nichtlinearitäten der Kennlinie des Bildsensors müssen ansonsten bei der Weiterentwicklung der digitalen Signalverarbeitung entsprechend berücksichtigt werden, damit sie - sofern nötig - ausgeglichen werden.

Wegen des hohen Arbeitsaufwands der Planung, Entwicklung und Validierung des Messaufbaus konnte im Rahmen dieser Arbeit nur die OECF des Bildsensors im High-Gain-Modus erfasst und untersucht werden. Da die OECF aber eine der wichtigsten Kenngrößen einer Kamera darstellt [129], können an den im Folgenden angestellten Überlegungen allgemeine Überlegungen zur Messtechnik an HDR-Kamerasystemen exemplarisch demonstriert werden. Schon an dieser Stelle soll, trotz methodischer Überschneidungen, grundsätzlich zwischen der Vermessung von Bildsensoren und der Vermessung von Kamerasystemen als Signalverarbeitungskette mit dem Bildsensor als Quelle und der Schnittstelle zur Übertragung der Bilddaten als Senke unterschieden werden. Im Broadcast sind dabei vor allem letztere von Bedeutung, da die Signalverarbeitungskette einen erheblichen Einfluss auf die Bildqualität eines Kamerasystems innerhalb des Gesamtsystems hat, wobei bei kommerziell erhältlichen Kamerasystemen die Wahl und Reihenfolge der Komponenten und deren Parameter gutgehütete Betriebsgeheimnisse sind. Dennoch kann bei Kamerasystemen für Broadcastanwendungen durch eine geeignete Wahl von Presets und frei wählbaren Parametern der Signalverarbeitungskette ein erheblicher Qualitätsgewinn gegenüber den Sensorrohdaten er-

⁵² *Opto-Electric Conversion Function*

⁵³ *International Telecommunication Union* <http://http://www.itu.int/en/ITU-R/>

reicht werden. Dies stellt jedoch die Messtechnik vor erhebliche Herausforderungen, da in diesem Fall eine Quantifizierung der Bildqualität für eine objektive Beurteilung schwer fällt. Der in der Broadcastpraxis sicherlich nicht irrelevante Aspekt der Überprüfung des Ausgangssignals auf Einhaltung der entsprechenden technischen Vorgaben in Bezug auf Flankensteilheit, Signalpegel, Jitter und noch eine Vielzahl weiterer Parameter soll in dieser Arbeit nicht weiter beleuchtet werden, da entsprechende Spezifikationen für HDR-Bewegt看bild entweder noch ausstehen oder sich nicht wesentlich von Standard-Messungen an HDTV-Signalen ohne erweiterten Dynamikbereich unterscheiden. Die im Broadcast durchgeführten Routine-messungen sind weder für eine messtechnische Klassifizierung von Kamerasystemen noch für die Untersuchung einzelner Komponenten der Systeme für Forschung und Entwicklung hinreichend präzise, da sie in der Regel für eine Schnellvalidierung und einen Abgleich der Kameraeinstellungen in der Produktionsumgebung konzipiert sind [130]. Dabei besitzt in erster Linie die möglichst effiziente und schnelle Erfassung aller relevanten Parameter eine hohe Priorität, was mit einer geringeren Präzision der Messung erkaufte wird. Dies reicht in der Regel jedoch im Produktionsalltag aus, um die Einhaltung der von den Sendern vorgegebenen Technischen Produktionsrichtlinien [12] zu gewährleisten. Für Forschung und Entwicklung werden meist andere Methoden verwendet, die eine möglichst präzise und reproduzierbare Messung ermöglichen, was jedoch einen vergleichsweise hohen Zeit- und Materialaufwand zur Folge hat.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass in der Broadcast-Praxis auch viele nicht oder nur indirekt messtechnisch quantifizierbare Faktoren, die jedoch den Arbeitsablauf maßgeblich bestimmen, letztlich in einem hohen Maße bei Anschaffung oder Leihę zur Wahl eines bestimmten Kamerasystems beitragen. Derartige Faktoren werden unter dem Schlagwort *Usability* subsummiert und erstrecken sich von der Zuverlässigkeit eines Kamerasystems über Support, "Ruggedness", Ergonomie, Qualität und "Wertigkeit" der Verarbeitung, Vielseitigkeit und Zusatzfunktionen bis hin zur Interoperabilität mit bestehenden Systemen. Obgleich diese Faktoren oft sogar maßgeblich zu einer Kaufentscheidung beitragen, sind sie nicht hinreichend quantifizierbar und sollen daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden.

5.2 Normen

Die im Rahmen dieser Thesis relevanten Normen lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisieren. Sie unterscheiden sich in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für Stand- oder Bewegtbildaufnahmeverfahren, dem gestellten Anspruch an die Abbildungsqualität⁵⁴, ihrer Verbreitung und ihrer Anwendbarkeit für HDR-Kamerasysteme.

Bei der Charakterisierung von Kamerasystemen für die Aufnahme von Standbild sind in erster Linie die ISO⁵⁵-Normen ISO12232 [131], ISO12233 [132] und ISO14524 [133] zu nennen. Obwohl sie zwar explizit für *still photography*, also die Aufnahme von Standbild, definiert sind, werden sie dennoch auch, teilweise erweitert, zur Charakterisierung von Bewegtbild-

⁵⁴Im Wesentlichen divergieren hier besonders die Normen für den Einsatz im Broadcast und die Normen für die Verwendung von Industriekameras für Messzwecke

⁵⁵International Organization for Standardization <http://www.iso.org>

kamerasystemen angewandt. [134] beschreibt Verfahren zur Durchführung von Messungen an Kamerasystemen im Broadcast, stellt jedoch im engeren Sinne keine Norm dar.

Im Bereich der Industriekameras ist in erster Linie der Standard 1288 der EMVA⁵⁶ [135], in dieser Arbeit im Folgenden mit *EMVA 1288* abgekürzt, zu nennen [136]. Er zielt auf die Verwendung von Kamerasystemen für industrielle und wissenschaftliche Messzwecke ab, weshalb er wesentlich umfangreichere Verfahren zur Charakterisierung derartiger Systeme bereitstellt.

Im Alltag ist leider festzustellen, dass in den Datenblättern der allermeisten kommerziell erhältlichen Kamerasysteme für Broadcastanwendungen zwar eine Auswahl verschiedener Kenngrößen zur Charakterisierung des Systems angegeben sind, meist jedoch der Verweis auf die zur Erfassung herangezogene Normen fehlt [137] [138]. Es ist daher nicht möglich, mehrere Kamerasysteme ausschließlich anhand der Datenblätter objektiv zu vergleichen, da weder die Erfassung der Werte unter Referenzbedingungen noch die Verwendung einheitlicher Formeln zur Berechnung der entsprechenden Kenngrößen vorausgesetzt werden kann. Es ist zwar anzunehmen, dass Hersteller von Kamerasystemen die Messungen in Anlehnung an die einschlägigen Normen vornehmen, jedoch muss unter Annahme des Worst-Case-Falls von erheblichen Abweichungen zu den normierten Messverfahren ausgegangen werden. Es ist ferner zu vermuten, dass die Werte in Produktdatenblätter insofern geschönt sind, dass die jeweils besten Werte aus den verschiedenen Betriebsmodi gesammelt und stets nur der jeweils beste Wert jeder Kategorie abgedruckt wird. Dies entspricht jedoch nicht dem regulären Produktionsbetrieb, wo zu jedem Zeitpunkt immer nur ein dedizierter Parametersatz verwendet werden kann.

Trotz der genannten Einschränkungen soll im Folgenden die Eignung der wichtigsten Normen für die Beurteilung von Kamerasystemen erörtert werden. Dabei sei ein besonderes Augenmerk auf die Vermessung von HDR-Kamerasystemen im Hinblick auf die Anforderungen von Forschung und Entwicklung gelegt. Eine Darstellung sämtlicher Normen und Messverfahren in thematischer Nähe zur Messung an Kamerasystemen, etwa der Messungen an Objektiven oder die Messungen an Bildsensoren auf Waferenebene (vgl. [139]) kann an dieser Stelle nicht geleistet werden.

5.3 Eignung bestehender Normen

ISO-Normen

Die ISO-Normen *ISO12232* [131], *ISO12233* [132] und *ISO14524* [133] sind für die ausführliche Charakterisierung eines Kamerasystems im Sinne einer Laboranalyse nach heutigen Gesichtspunkten nur eingeschränkt geeignet, da sie trotz mehrerer Aktualisierungen in erster Linie vor allem der Vergleichbarkeit von Kamerasystemen mit Bildsensoren und Kameras mit chemischem Film dienen. Da heutige elektronische Kameras einen höheren Dynamikumfangs, einen weiteren Farbraum und andere Parameter, die nicht in den Normen vorgesehen sind, besitzen, können diese Standards zur Charakterisierung von Bewegtbildkamerasystemen, insbesondere im Falle von HDR-Kamerasystemen, nur nach erheblichen Modifikationen zur

⁵⁶European Machine Vision Association <http://www.emva.org>

Charakterisierung dieser Kamerasysteme verwendet werden. Die trotzdem recht große Popularität der ISO-Standards ist in erster Linie in der vergleichsweise einfachen technischen Umsetzung der Messung begründet. Sie ermöglichen, auch im Produktionsbetrieb, eine schnelle Überprüfung einiger wichtiger Parameter. So lässt sich beispielsweise fast in Echtzeit feststellen, ob die Kennlinie eines Kamerasystems linear, mit Gamma oder sogar logarithmisch verläuft.

Da die meisten Ausprägungen der ISO-Normen die Aufnahme eines Testcharts mit anschließender Auswertung der Bilddaten vorsieht, trägt das verwendete Objektiv maßgeblich zum Ergebnis der Messung bei. So kann etwa bei kurzen Brennweiten eine Vignettierung und starke Verzerrung eine zuverlässige Auswertung erschweren oder gar unmöglich machen. Mit dem in der Norm *ISO12232* [131] beschriebenen Verfahren zur Messung der MTF kann nur die MTF des Kamerasystems zuzüglich der Optik bestimmt werden. Um die MTF des Kamerasystems zu bestimmen muss daher der Einfluss der Objektiv-MTF weitgehend ausgeblendet werden, was in der Praxis bedeutet, dass die MTF des Objektivs um einige Größenordnungen besser sein muss als die des Sensors. Im Rahmen dieser Arbeit wird die MTF des Kamerasystems *HiDyV* nicht weiter untersucht und ist an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber genannt.

EMVA 1288

Die Norm *EMVA 1288* beschreibt neben verschiedenen mathematischen Funktionen zur Modellierung von Empfindlichkeit und Übertragungsverhalten sowie unerwünschten Nebeneffekten wie verschiedenen Ursachen und Ausprägungen von Rauschen auch weitreichende Empfehlungen zur Durchführung und Auswertung von Messungen an Kamerasystemen. In der *EMVA 1288* wird jedoch kein konkreter Messaufbau vorgeschrieben oder ein Referenzaufbau vorgeschlagen; es werden lediglich Anforderungen genannt, die im Rahmen der Messung nach diesem Standard zu erfüllen sind. In der Praxis sind diese Anforderungen zumindest teilweise problematisch. Beispielsweise werden Anforderungen an die im Rahmen der OECF-Messung zu verwendende Lichtquelle gestellt, die in der Praxis nur mit erheblichem Aufwand erreicht werden können. Die Validierung eines Messaufbaus zur Gewährleistung der Einhaltung aller in der *EMVA 1288* genannten Parameter ist dadurch weit aufwändiger als bei der Messung nach den oben genannten ISO-Normen und setzt das Vorhandensein etlicher Messgeräte voraus, was an großen und etablierten Forschungsinstituten wie dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS recht unproblematisch ist. Kleinen Entwicklungsbüros bleibt dadurch, wie auch kleineren Produktionsfirmen oder sogar den größeren Funkhäusern, in Zeiten immer kleinerer Budgets eine Umsetzung von Messaufbauten nach dieser Norm verwehrt.

Die Untersuchung von Kamerasystemen nach dem Standard *EMVA 1288* ermöglicht zwar eine umfangreiche Charakterisierung von Kamerasystemen, für viele Anwendungen, etwa im Broadcast, ist eine derartige Präzision jedoch nicht notwendig und sogar unerwünscht: Die im Rahmen einer vollständigen Charakterisierung nach der *EMVA 1288* ermittelten Datensätze sind sehr umfangreich, was einen schnellen Überblick und eine direkte Einordnung gegenüber der stark vereinfachten Darstellung gemäß der oben genannten ISO-Normen eher erschwert.

Schlussfolgerung

Alle im Rahmen dieser Arbeit recherchierten und untersuchten Normen repräsentieren die Einsatzbedingungen im Broadcast nur unzureichend. So wird etwa im Messaufbau zur Bewertung von Kamerasystemen gemäß der *EMVA 1288* eine homogene monochromatische Beleuchtung des Bildsensors vorausgesetzt [135], was in den meisten Fällen für die praktische Anwendung nur wenig repräsentativ ist. Da dadurch während der Messung die Funktion der in Kamerasystemen für Broadcastanwendungen implementierten Bildverbesserungsalgorithmen in derartigen Situationen stark eingeschränkt ist, wird gegenüber einem realen Einsatz in der Praxis eine stark reduzierte Bildqualität gemessen; die Messergebnisse sind dadurch nicht repräsentativ und kaum vergleichbar.

Für Forschung und Entwicklung wiederum sind eine reproduzierbare Umgebung und die konsequente Einhaltung eines Prozederes unabdingbar, um die Auswirkung von Modifikationen an einzelnen Komponenten eines Kamerasystems auf die Wirkungsweise der gesamten Signalverarbeitungskette von der Quelle, in der Regel der Bildsensor, bis hin zur Senke, in der Regel eine Möglichkeit zur Übertragung oder Aufzeichnung des Signals, beurteilen zu können. Nur so können Synergien zwischen einzelnen Komponenten erforscht und weitere Parameteroptimierungen in der Signalverarbeitungskette aufgrund einer systematischen Analyse der Messergebnisse vorgenommen werden.

Es fällt auf, dass in den einschlägigen Proceedings der IEEE und SPIE wiederholt die Anwendbarkeit der verschiedenen Normen recht kontrovers diskutiert wird, da mit modernen Messgeräten und der Rechenleistung heutiger Computer verschiedenen Aspekten in der Durchführung und Auswertung wesentlich besser Rechnung getragen werden kann [140], was praxisnähere und präzisere Messungen ermöglichen würde [141]. Weiter fällt besonders vor dem Hintergrund der Thematik dieser Arbeit auf, dass die Normen in der Regel viele technologische Neuerungen nicht abdecken und in vielen Fällen nicht oder erst sehr spät entsprechend aktualisiert oder erweitert werden. Auch neue Erkenntnisse oder die Revision verwandter Normen können die Notwendigkeit einer Variation der verwendeten Parameter zur Folge haben [142]. Es ist daher bei Kamerasystemen mit vom Standard abweichenden Eigenschaften gängige Praxis, die bestehenden Normen nach Bedarf anzupassen und zu erweitern [143]. Etliche Kamerasysteme für Digital Cinema besitzen beispielsweise mittlerweile deutlich höhere Dynamikumfang als in *ISO14524* [133] vorgesehen. Die Norm sieht einen maximalen Dynamikumfang von 60 dB vor [133], wohingegen Kamerasysteme wie *RED Epic*, *ARRI Alexa* oder die *Blackmagic Production Camera 4K* mit Dynamikumfangen von 13.5 [144], 14 [145] und 12 [146] Blendenstufen, entsprechend 81, 84 und 72 dB beworben werden. Es scheint evident, dass sich diese Problematik bei dedizierten HDR-Kamerasystemen noch weiter fortsetzt. Es wurden jedoch verschiedene modifizierte Aufbauten in Anlehnung an die entsprechenden Normen vorgeschlagen, etwa in [147]. Die Tauglichkeit derartiger Systeme ist jedoch noch in der Praxis zu erproben; so ist für messtechnische Anwendungen sowohl die Homogenität der Ausleuchtung als auch die Kongruenz der einzelnen Folien des Testcharts im Aufbau nach [147] noch nicht ausreichend.

Eine Alternative stellt der Vergleich von realen Bildern eines Kamerasystems mit synthetisch erzeugten Bildern dar, in denen sowohl der Bildsensor als auch die anschließende Signalverarbeitung mit den entsprechenden Fehlerquellen wie Rauschen, Crosstalk, Aliasing

und vielen weiteren Effekten simuliert wird [148] [149]. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass in der Simulation die Auswirkung unerwünschter Effekte in den Komponenten der Signalverarbeitungskette des Kamerasystems in Hinblick auf ihre Auswirkung auf das Gesamtsystem detailliert untersucht werden kann. Weiter kann ohne großen Mehraufwand auf Zwischenergebnisse zugegriffen werden, was in einer realen Messung oft nicht oder nur mit hohem Mehraufwand möglich wäre. Dies ermöglicht eine Kosten-Nutzen-optimierte Weiterentwicklung, da unerwünschte Effekte nach der Stärke ihrer Auswirkung priorisiert eliminiert oder zumindest reduziert werden können. Es ist allerdings recht evident, dass die Qualität der Ergebnisse bei diesem Verfahren maßgeblich von der Qualität und Präzision des verwendeten pseudodeterministischen Simulationsmodells abhängt, mit steigender Präzision steigt jedoch auch der Rechenaufwand überproportional stark an. Dies führt in Kombination mit einer Vielzahl von in realen Kamerasystemen vorhandenen stochastischen Signalquellen in Form von Rauschen⁵⁷ an verschiedenen Stellen der Signalverarbeitungskette dazu, dass eine exakte Simulation sehr rechenaufwändig ist. Im Extremfall könnten derartige Simulationen bis hin zu einer quantenmechanischen Simulation der Baugruppen eines Kamerasystems getrieben werden, was jedoch für die Praxis eindeutig untauglich ist. Auch die Anpassung der Simulationsmodelle an neue Technologien ist bei einer starken Spezialisierung sehr aufwändig; weiter besteht die Gefahr der Überanpassung.

Dennoch basiert beispielsweise die Berechnung einzelner Kenngrößen der *EMVA 1288* aus diversen zuvor zu bestimmenden Messwerten auf einer mathematischen Modellierung, die jedoch aus den oben ausgeführten Gründen stark vereinfacht wurde. Dennoch konnte für vergleichbare Modelle gezeigt werden, dass in der Praxis bei geschickter Modellierung Simulationen mit vertretbarem Aufwand hinreichend präzise Näherungen an die Messungen an real existierenden Kamerasystemen erreichen können [150]. Weiter können für zukünftige Entwicklungen Vorhersagen über das Verhalten von Bildsensoren gegeben werden [151].

Im Broadcastalltag sind derartige Überlegung sicherlich nur eingeschränkt von Interesse, da eine Vielzahl der dadurch erlangten Werte trotz stark erhöhtem Zeit- und Materialaufwand nur wenig Erkenntnisgewinn im Alltag bedeuten. Eine Rückschluss von Labormesswerten auf das Verhalten im Alltag ist sowohl bei Industriekamerasystemen [152] als auch bei Kamerasystemen für Broadcastanwendungen [52] nur äußerst eingeschränkt gegeben, da viele praxisrelevante Parameter nicht oder nur eingeschränkt messtechnisch erfasst werden können.

Da bei der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Messung nur Teilaspekte der vorgestellten Normen zu untersuchen sind und da einige Aspekte, etwa der hohe Dynamikumfang des zu vermessenden Systems, in den vorgestellten Normen nur unzureichend berücksichtigt werden, wird im folgenden die Konstruktion eines Aufbaus und die Durchführung einer Labormessung in Anlehnung an die Norm *EMVA 1288* dargestellt, wobei nur eine Teilmenge der dort vorgeschriebenen Messwerte erfasst und beurteilt wird.

5.4 Exemplarische Messung an einem Prototyp für ein HDR-Kamerasystem

Im Rahmen dieser Arbeit war ein Messsystem für die abschnittsweise Erfassung der OECF des am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS entwickelten HDR-Kamerasystems

⁵⁷meist spektral geformt

HiDyV zu entwerfen und umzusetzen. Zielsetzung des Messverfahrens ist dabei eine möglichst präzise und reproduzierbare Labormessung der OECF, die mit der Option einer späteren Halb- oder Vollautomatisierung des Messverfahrens auch im Hinblick auf eine möglichst optimale Nutzung der Laborfläche und Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen wie Schwankungen in Raumtemperatur oder Umgebungsbeleuchtung eine präzise Einstellung einer sehr kleinen Beleuchtungsstärke am Bildsensor und die koaxiale oder pseudo-koaxiale Messung der Beleuchtungsstärke am Bildsensor ermöglichen soll. Im Folgenden soll zunächst ein Überblick über das zu vermessende Kamerasystem gegeben und anschließend der Messaufbau dargestellt werden.

5.4.1 Eigenschaften des zu vermessenden Kamerasystems

Das HDR-Kamerasystem *HiDyV* des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS wurde zur Erforschung der Möglichkeiten und technischen Besonderheiten sowie zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von CMOS-Kamerasystemen mit stark erweitertem Dynamikumfang entwickelt.

In dem im Rahmen dieser Arbeit zu vermessenden Prototyp wird ein sCMOS⁵⁸-Bildsensor zur Erfassung von Stand- und Bewegtbild verwendet, dessen Funktion auf einem Multi-Readout-Verfahren beruht. Gemäß den Angaben des Bildsensordatenblatts kann der sCMOS-Bildsensor bei einem Pixelformat von $6,5\ \mu\text{m} \times 6,5\ \mu\text{m}$ mit 2/3 Zoll Sensordiagonale im Full-HD-Format mit bis zu 50 fps Bewegtbilder mit einer Dynamik von bis zu 90 dB erfassen, wobei die Pixelzellen in 5T-Technologie mit Pinned Photodioden als Photodetektor besonders im Hinblick auf einen sehr niedrigen Rauschpegel optimiert wurden [153]. Der prinzipielle Aufbau der Readoutschaltung kann dem Blockschaltbild in Abbildung 9 entnommen werden.

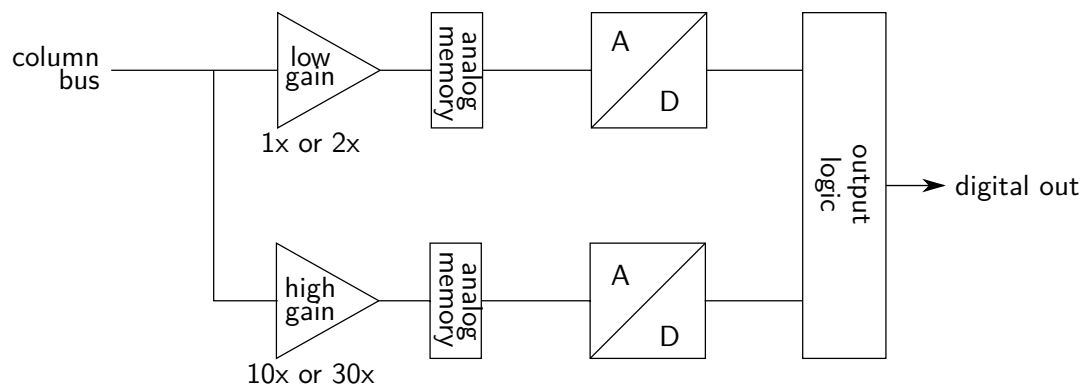


Abbildung 9: Prinzipschaltbild sCMOS-Readout

Als DSP-Einheit ist im Kamerasystem ein FPGA verbaut. Um im Rahmen dieser Messung jedoch eine unverfälschte Kennlinie des Bildsensors aus den Sensorrohdaten ermitteln zu können, wurde eine Firmwarevariante entwickelt, die unprozessierte und unkomprimierte

⁵⁸scientific CMOS Imaging Sensor

Rohdaten an ein GigE-Vision⁵⁹-Modul streamt. Dies ermöglicht einerseits die einfache Übertragung der erheblichen anfallenden Datenmengen und erleichtert die Entwicklung der weiteren Signalverarbeitungskette, da die Kamerabilder für Tests direkt im Rechner verarbeitet werden können, ohne dass der Umweg über eine Framegrabberkarte gegangen werden muss, um das Ergebnis von Modifikationen am Algorithmus zu prüfen. Des Weiteren entfällt dadurch bei der Entwicklung der Firmware die ständige Neuprogrammierung des EEPROMS⁶⁰, der die Konfiguration des FPGA speichert und nur einige zehntausend Mal neu programmiert werden kann. Für eine Anwendung im Broadcast könnte das Übertragungsmodul problemlos gegen eine dort übliche Schnittstelle, beispielsweise 3G-HD-SDI, ausgetauscht werden. Die Konfiguration des Bildsensors übernimmt ebenfalls der FPGA, wobei die Befehle zum Setzen bestimmter Sensorparameter wie Belichtungszeit, Verstärkungsfaktoren und Betriebsmodi über die GigE-Vision-Schnittstelle vom Rechner aus gesendet und im FPGA entsprechend den Vorgaben des Sensorherstellers in Steuersignale umgesetzt werden.

Im Rahmen der Messungen wird das Kamerasystem noch mit einigen Einschränkungen betrieben, um die Einhaltung bestimmter Betriebsparameter zu gewährleisten. Beispielsweise wird die Bildwiederholrate derzeit aufgrund der leicht reduzierten Netzwerkbandbreite gegenüber einem GigE-Vision Dual Link (vgl. [155]) oder einer 3G-HD-SDI-Schnittstelle auf 20 fps⁶¹ gedrosselt, um eine Übertragung aller Datenpakete zu gewährleisten⁶². Des Weiteren kann der derzeit verwendete sCMOS-Bildsensor wahlweise in den Betriebsarten Global Shutter oder Rolling Shutter betrieben werden, wobei das Kamerasystem für die Messung im Rolling Shutter-Modus betrieben wurde, da andernfalls Modifikationen an der Beschaltung des Bildsensors notwendig geworden wären. Da jedoch für diese Messung der Einfluss von Rolling-Shutter-Artefakten vernachlässigt werden kann, spielt diese Konfiguration eine untergeordnete Rolle. Um einen Einfluss des Color-Filter-Arrays in Form von optischer Absorption und Crosstalk auszuschließen wurde für die Messung eine elektrisch identische Variante des Bildsensors ohne Color-Filter-Array verwendet. Das elektronisch und optoelektronisch identische Verhalten beider Sensorvarianten wurde bereits im Vorfeld dieser Arbeit von den Ingenieuren der Gruppe Bildsensorik des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS experimentell nachgewiesen. Daher lassen sich die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit an der Monochrom-Variante des Bildsensors vorgenommenen Messungen mit zu vernachlässigenden Einschränkungen auch auf die Variante des Bildsensors mit Color-Filter-Array anwenden, der heutzutage üblicherweise in einem Kamerasystem für Broadcastanwendungen verwendet wird.

Auf der dieser Arbeit beigelegten CD-ROM sind Aufnahmen einer Szene mit hohem Dynamikumfang zur Illustration der Leistungsfähigkeit des Bildsensors enthalten. Für eine praxisnähere Demonstration wurde für die Aufnahme dieser Bilder die Sensorvariante mit Color-Filter-Array gewählt, welches beim sCMOS-Bildsensor als Bayer-Pattern ausgeführt ist.

Zum Anschluss von Objektiven ist beim Prototyp des Kamerasystems ein C-Mount-Gewindeanschluss gemäß [156] vorgesehen.

⁵⁹Standard zur Ansteuerung von Kameras für Bildverarbeitungszwecke [154]

⁶⁰Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, nichtflüchtiger elektronischer Speicherbaustein

⁶¹frames per second

⁶²Andernfalls könnten einzelne Frames bei der Übertragung verloren gehen, was bei einem Teil der verwendeten Software zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann.

5.4.2 Zu erfassende Kenngrößen

Aus der OECF, wie sie im Rahmen dieser Arbeit zu bestimmen ist, und einigen Zusatzmessungen lassen sich in Anlehnung an die *EMVA 1288* [135] verschiedene wichtige Messwerte ableiten. Die im Folgenden genannten Messwerte stellen dabei keine vollständige Aufzählung dar, sondern stellen eine Auswahl der wichtigsten im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Messwerte dar. Quanteneffizienz, das Rauschverhalten bei verschiedenen Beleuchtungsstärken und die Defektpixelverteilung konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr ausgewertet werden.

Rauschen im Dunkelbild

Das Rauschen im Dunkelbild, kurz *Dunkelrauschen*, ist als Standardabweichung σ_d der Dunkelbilddifferenz zweier Dunkelbilder definiert, wobei der Zentralwert μ der Differenz näherungsweise Null sein soll, da ansonsten nicht von einem normalverteilten Rauschen ausgegangen werden kann. Bei der Aufnahme der Dunkelbilder muss die Kamera schon ihre Betriebstemperatur erreicht haben, da das Dunkelrauschen stark temperaturabhängig ist [157]. Weiter wird in der *EMVA 1288* empfohlen, die Bilder als Einzelframes aus einem Bilddatenstrom zu extrahieren, um Transienteneffekte zu vermeiden.

Das Dunkelrauschen ist ein wichtiges Maß für den minimalen Rauschteppich eines Kamerasystems.

Sättigungspunkt

Der Sättigungspunkt beschreibt das letzte Wertetupel aus Beleuchtungsstärke am Sensor und Ausgabewert des Sensors, für den zwischen beiden Größen noch ein linearer Zusammenhang besteht. Dies wird in Abbildung 10 deutlich, die die idealtypischen Kennlinie der gemittelten Pixelwerte eines CMOS-Bildsensors darstellt.

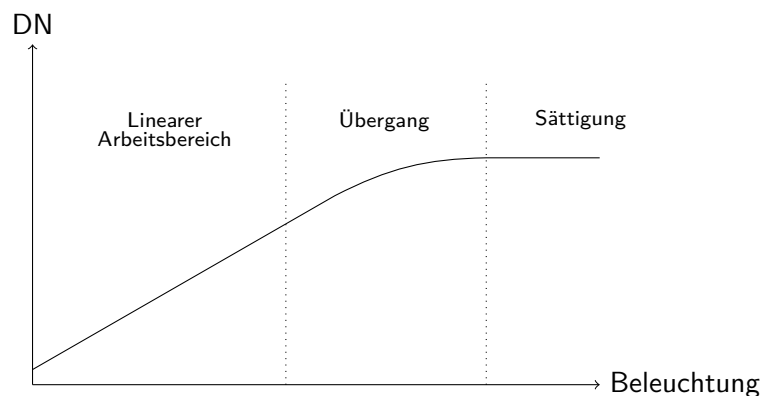


Abbildung 10: Typische OECF eines CMOS Bildsensors

Zur offensichtlicheren Darstellung wurde der Übergangsbereich deutlich breiter als in der Realität dargestellt. Bei realen Messwerten ist es jedoch kaum möglich, mit geometrischen oder numerischen Verfahren besagten Wert zu bestimmen, weshalb in der *EMVA 1288* vorgeschlagen wird, stattdessen das globale Maximum des Photon Shot Noise zur Bestimmung des Sättigungspunktes heranzuziehen [135], da das Photon Shot Noise mit zunehmender Beleuchtungsstärke merklich ansteigt. Sobald eine Pixelzelle ihren Sättigungspunkt erreicht hat, kann sie jedoch den Rauschpegel nicht mehr vollständig in ein elektrisches Signal umwandeln, wodurch das Rauschen wieder abnimmt. Im Extremfall, also beim Erreichen der Full-Well-Kapazität, sinkt das Photon Shot Noise sogar auf näherungsweise Null. Im Falle des sCMOS-Bildsensors stellt der Sättigungspunkt den idealen Schwellwert für die Umschaltung zwischen Highgain- und Lowgain-Readout dar, sodass der lineare Abschnitt der Kennlinie bestmöglich ausgenutzt wird.

Dynamik

Für die Dynamik existieren verschiedene Definitionen⁶³, wobei an dieser Stelle die Definition der *EMVA 1288* Verwendung finden soll [135]

$$DR = \frac{\mu_{p.sat}}{\mu_{p.min}}$$

wobei $\mu_{p.sat}$ die Beleuchtungsstärke am Sättigungspunkt der OECF und $\mu_{p.min}$ den Punkt der kleinsten vom Dunkelrauschen unterscheidbaren Beleuchtungsstärke bezeichnet. Im Gegensatz zur *EMVA 1288* soll in dieser Arbeit als optische Bezugsgröße der OECF nicht die Zahl der Photonen μ_p , sondern die Beleuchtungsstärke $W_{Bildsensor}$ in $W\ m^{-2}$ verwendet werden, wobei in [135] eine Gleichung zur Umrechnung der Einheiten angegeben ist.

Zur besseren Darstellung und leichteren Vergleichbarkeit mit anderen Publikationen sollen in dieser Arbeit alle Angaben zur Dynamik in dB erfolgen, wobei gilt, dass

$$DR\ [dB] = 20 \log \frac{W_{Bildsensor.sat}}{W_{Bildsensor.min}}$$

mit $W_{Bildsensor.sat}$ als Beleuchtungsstärke des Bildsensors am Sättigungspunkt der OECF und $W_{Bildsensor.min}$ als minimale vom Dunkelrauschen zu unterscheidende Beleuchtungsstärke.

OECF

Aus dem Verlauf OECF selbst lassen sich viele wichtige Rückschlüsse über das Verhalten eines Kamerasystems oder Bildsensors ziehen [159]. An dieser Stelle sei jedoch auf das Kapitel 5.4.5 *Bewertung der Messergebnisse* verwiesen, wo die anhand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messung geplottete OECF ausführlich diskutiert wird.

⁶³ Einige Hersteller geben in ihren Datenblättern und Publikationen das Verhältnis des Full-Well-Pegels zum Grundrauschen als Dynamikumfang an [158], was zu irreführend erhöhten Werten im Datenblatt führt. Diese entsprechen jedoch nicht der tatsächlich verwertbaren Dynamik, da diese durch den Sättigungspunkt begrenzt ist, der in der Regel deutlich unterhalb der Full-Well-Schwelle liegt.

5.4.3 Messaufbauten

Im Folgenden wird zunächst der bisher am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS verwendete Referenzaufbau zur Bestimmung der OECF von Kamerasystemen vorgestellt werden, anschließend wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Aufbau beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführende Messung wurde mehrfach mit beiden Aufbauten durchgeführt, um systematische Fehler auszuschließen und um die Eignung des entwickelten Aufbaus für die gegebene Messaufgabe zu validieren.

Referenzaufbau

Der bisher am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen für OECF-Messungen verwendete Referenzaufbau wurde in Anlehnung an die Normen *EMVA 1288* [135] und die in *ISO14524* [133] empfohlene Focal-Plane-Methode entwickelt und seit vielen Jahren kontinuierlich weiter verbessert. Der Aufbau ist Abbildung 11 zu entnehmen.

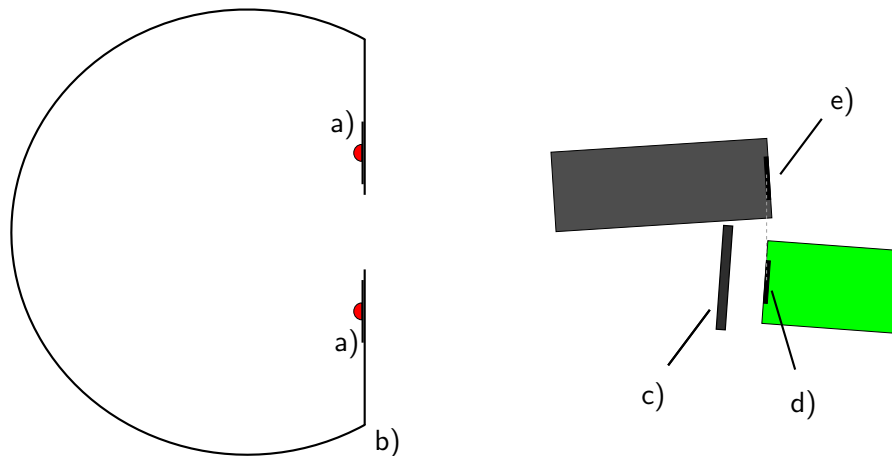


Abbildung 11: Referenzaufbau

- a) Lichtquelle in Form von Power-LED(s), für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Messung eine einzelne Rote Power-LED mit einer Dominantwellenlänge von 624 nm bei einer Halbwertsbreite von 20 nm
- b) Ulbricht-Kugel, deren Austrittsblende als Lochblende mit einem Durchmesser von 55 mm ausgeführt ist
- c) ND-Filter, je nach Messbereich zu wählen. Im Falle der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Messung mit einer optischen Dichte von 2,3
- d) Bildsensor des zu vermessenden Kamerasystems

- e) Referenz-Photodiode, die in Bezug zum Bildsensor äquidistant zur Austrittsöffnung der Ulbricht-Kugel zu montieren ist

Als Lichtquelle dienen Power-LEDs, die sich ohne zusätzliche Aufsatzoptik in guter Näherung als Lambert-Strahler verhalten. Durch Variation des LED-Stroms⁶⁴ kann die Helligkeit eingestellt werden; wahlweise kann durch den Einsatz von LEDs mit verschiedenen Wellenlängen unter Zuhilfenahme eines Referenzmessgeräts ein RGB-Tristimulus erzeugt werden [18]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch für eine pseudomonochromatische Beleuchtung des Sensors nur eine rote Power-LED mit einer Dominantwellenlänge von 624 nm bei einer Halbwertsbreite von 20 nm verwendet. Die Einhaltung der Spektralcharakteristik wurde vor Beginn und nach Abschluss jeder Messung mit einem Spektrometer⁶⁵ kontrolliert und bei Abweichung von den Sollwerten die Messung wiederholt. Die LEDs strahlen in eine Ulbricht-Kugel⁶⁶ hinein; die integrierte Lichtquelle der Ulbricht-Kugel wird nicht benutzt. Die Austrittsöffnung der Ulbricht-Kugel, die von einer Lochblende mit einem Durchmesser von 55 mm begrenzt wird, stellt dadurch eine homogene Leuchtfläche dar. Das Verhältnis der Größe der Blende zur Bildsensordiagonale und der Entfernung zwischen Bildsensor und Blende wurde gemäß den Vorgaben in der Norm *EMVA 1288* [135] gewählt.

Das Kamerasystem ist derart zu positionieren, dass sich der Bildsensor in einer Entfernung von 220 mm rechtwinklig zur Lichtaustrittsöffnung der Ulbricht-Kugel in gleicher Höhe befindet. Für die Messung am Kamerasystem *HiDyV* ist wegen der hohen Lichtempfindlichkeit des Bildsensors direkt vor dem Kamerasystem ein ND-Filter⁶⁷ angebracht, der die Beleuchtungsstärke am Bildsensor um einen konstanten Wert abschwächt. Die Modulation der Helligkeit erfolgt durch Regelung des LED-Stroms⁶⁸ und wird mittels einer Photodiode neben dem zu vermessenden Kamerasystem kontrolliert, da der Wirkungsgrad von LEDs stark nichtlinear ist und die aufgenommene elektrische Leistung daher nicht zur Bestimmung der optischen Ausgangsleistung herangezogen werden kann. Die Photodiode⁶⁹ ist an einen Transimpedanzverstärker angeschlossen, dessen Ausgangsspannung mit einem Digitalvoltmeter⁷⁰ gemessen wird. Die Kennlinie der Photodiode mit dem zugehörigen Photodiodenverstärker wurde in einem Vorversuch unter Verwendung der selben Lichtquelle zur Gewährleistung einer identischen Spektralcharakteristik mit einem Colormeter⁷¹, welches als empfindliches Luxmeter verwendet wurde, und einem Messgerät für optische Leistung⁷² aufgenommen. Dadurch konnte gezeigt werden, dass sich die Photodiode im relevanten Arbeitsbereich hinreichend linear verhält. Weiter konnten Werte für die Umrechnung der Spannung am Ausgang des Verstärkers in eine Beleuchtungsstärke in lx und in eine Strahlungsleistung in $W m^{-2}$ bestimmt

⁶⁴zur Versorgung wurde ein programmierbares Labornetzgerät vom Typ HAMEG HMP2030, S/N 058600030 verwendet

⁶⁵Typ JETI Specbos-1100, S/N 319438

⁶⁶Typ Esser LV-5, S/N 5114

⁶⁷Neutralschichtfilter Typ Schott NG9, Schmelze 135065

⁶⁸Die in [135] vorgeschlagene Option zur Modulation der Helligkeit der LED-Lichtquelle durch einen gepulsten Betrieb der LED wurde wegen der zu erwartenden Rolling-Shutter-Artefakte verworfen.

⁶⁹Typ BPW34, betrieben im linearen Photodioden-Modus, zur Vermeidung von Streulichteinfluss in einem Aluminiumtubus montiert

⁷⁰Typ Keithley Integra 2700, S/N 1029591

⁷¹Typ Gigahertz Optik HCT-99, S/N 2391M-0 mit Messkopf CT-4501-4, S/N 3071

⁷²Optical Powermeter Typ Newport Photonics Test System Model 8800 mit Messkopf 918-UV S/N 0877

werden. Die lichtempfindliche Oberfläche der Photodiode ist in der gleichen Distanz zur Leuchtfläche montiert wie der Bildsensor und ist auf diese ausgerichtet. Bei der Photodiode befindet sich kein ND-Filter im Strahlengang, sodass für eine korrekte Messung die Abschwächung des ND-Filters zwischen Bildsensor und Lichtaustrittsfläche der Ulbricht-Kugel im Vorversuch bestimmt und als Korrekturfaktor in die Berechnung der Beleuchtungsstärke und Strahlungsleistung am Bildsensor mit einbezogen wird. Weil die Messung der Helligkeit nicht koaxial oder pseudokoaxial vorgenommen wird, sondern lateral versetzt zum Bildsensor erfolgt, kann die Helligkeit nicht an der Position des Sensors bestimmt werden. Da die Austrittsfläche der Ulbricht-Kugel in sehr guter Näherung als Lambertstrahler angenommen werden kann [160] ist eine möglichst nahe Positionierung der Photodiode am Bildsensor zu bevorzugen. Im hier vorliegenden Versuch wird die winkelabhängige Abschwächung des auf die Photodiode auftreffenden Lichts im Vorversuch bestimmt und über einen Korrekturfaktor in die Berechnung der Beleuchtungsstärke und Strahlungsleistung am Bildsensor mit einbezogen. Dies setzt jedoch eine präzise Positionierung der Photodiode voraus, die deshalb über ein Stativsystem am optischen Tisch befestigt wird. Es konnte im Vorversuch nachgewiesen werden, dass die Position der Photodiode das Messergebnis zwar nur geringfügig, aber doch nachweisbar beeinflusst, weshalb dieser Effekt berücksichtigt wurde.

Der Referenzaufbau ist sehr empfindlich gegenüber parasitär einfallendem Streulicht, etwa durch Raumbelichtung, Tageslicht oder sogar den leuchtenden Displays von Messgeräten, weshalb er in optisch absorbierendes Material, in diesem Falle schwarzen Bühnenmolton, eingehaust werden muss, wobei das umgebende Optiklabor zusätzlich bestmöglich zu verdunkeln ist. Dies ist neben dem verhältnismäßig großen Platzbedarf des Aufbaus von über 75 cm x 150 cm insofern ungünstig, weil nicht nur viel teure Laborfläche benötigt wird, sondern das gesamte Labor während der Messung nicht anderweitig genutzt werden kann, da andere Messungen potentiell den Aufbau stören. Da sich die Position des Kamerasystems auf dem optischen Tisch nicht zufriedenstellend mechanisch mit der Position der Ulbricht-Kugel koppeln lässt, müssen Änderungen der gemessenen Helligkeit aufgrund einer ungewollten Distanzvariation zwischen Kamerasystem und Ulbricht-Kugel durch eine weitgehende Vermeidung externer mechanischer Einflüsse gewährleistet werden. Als problematisch erwies sich im Experiment dabei die Umhausung mit schwarzem Bühnenmolton, da schon geringe Positionsänderungen des Stoffs, etwa durch Luftzug, die Lichtverhältnisse im Messaufbau durch minimale diffuse Reflexionen des Lichts am Molton verändern. Diesem Missstand kann nur durch ein sorgfältiges Abspannen des Stoffs abgeholfen werden, was sich in einer erheblichen Steigerung des Arbeitsaufwands niederschlägt, da vor jeder Änderung an den Komponenten des Aufbaus im Rahmen der Justage der Molton abzunehmen und nach Abschluss der Arbeiten wieder neu zu verspannen ist. Dabei muss Sorge getragen werden, dass sich die Position der Ulbricht-Kugel und der Photodiode relativ zur Umhausung und relativ zueinander nicht ändert.

Eine potentielle Drift der Spektralcharakteristik der verwendeten LED durch das Dimmen über die Stromregelung [161] konnte mit dem vorhandenen Spektrometer⁷³ weder in einem Langzeit-Vorversuch noch im Rahmen des Hauptversuchs nachgewiesen werden, lässt sich bei dieser Vorgehensweise jedoch nicht pauschal ausschließen. Eine Spektraldrift der Lichtquelle

⁷³Typ JETI Specbos-1100, S/N 319438

äußert sich wegen der wellenlängenabhängigen Quantenausbeute von Halbleiterbildsensoren bei der Messung der OECF in einem nicht mit der Bestrahlungsstärke korrelierten Messfehler. Da im vorgestellten Aufbau keine spektrale Drift nachweisbar war, wurde der Effekt im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Aus mechanischen Gründen ist bei diesem Aufbau eine thermische Stabilisierung der LED zur Gewährleistung einer konstanten Temperatur des Halbleitersubstrats [162] nicht möglich.

Wegen der nur endlichen Zahl an ND-Filtern und wegen der nur auf 0,1 mA genau einstellbaren Stromregelung des verwendeten Labornetzgeräts kann in diesem Aufbau keine beliebige Referenzhelligkeit eingestellt werden, was besonders für kleine Beleuchtungsstärken ungünstig ist. Hier kann eine präziser einstellbare Stromquelle Abhilfe schaffen. Allerdings stand im Rahmen dieser Arbeit keine Stromquelle zur Verfügung, die einen Bereich von 0 bis 1000 mA mit der dafür nötigen Präzision regeln kann.

Aufbau auf optischer Bank

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein alternativer Messaufbau entwickelt, der die präzise Aufnahme der OECF ermöglicht. Dabei wurde besonderer Wert auf einen kompakten und gegen Umwelteinflüsse weitgehend unempfindlichen Aufbau gelegt, der das sehr präzise Einstellen kleiner Lichtmengen für eine besonders präzise Vermessung des unteren Kennlinienabschnitts ermöglicht.

Um ein Maximum an Präzision bei größtmöglicher Stabilität zu erreichen wurde als mechanische Grundlage des Aufbaus das Linos Microbanksystem der Firma Qioptiq⁷⁴ gewählt. Dieses System erlaubt einen kompakten Aufbau der Versuchsanordnung, der durch 4 Führungstangen eine hohe Stabilität aufweist. Benötigte Komponenten werden im Baukastensystem in den Aufbau integriert und anschließend reversibel fixiert, sodass der Aufbau im Zuge zukünftiger Weiterentwicklungen bei Bedarf jederzeit mit Standardkomponenten erweitert werden kann. Die nicht im Lieferprogramm der Lieferanten optischer Komponenten enthaltenen Baugruppen wie die zur Messung der Bestrahlungsstärke verwendete Photodiode, die temperaturstabilisierte LED und der Tubus zum Anschluss des zu vermessenden Kamerasystems mittels C-Mount wurden gesondert beschafft und mittels Adapterplatten in den Aufbau integriert.

Der Aufbau besteht aus einer temperaturstabilisierten Power-LED⁷⁵ als Lichtquelle, deren Chip über ein Linsensystem als möglichst kleines Zwischenbild auf einen verstellbaren Graufilter, ausgeführt als mittels Mikrometerschraube orthogonal zur optischen Achse verschiebbarer Graukeil, abgebildet wird. Anschließend divergiert der Strahl und trifft auf eine Diffusorscheibe, die das Licht in Transmissionsrichtung zerstreut. Der Chip der LED wird dabei auf den vollen Durchmesser des Diffusors abgebildet. Die gegenüberliegende Seite wird aufgrund von Transmission erleuchtet, wobei die Leuchtfläche durch eine Ringblende begrenzt wird. Das von dieser Leuchtfläche ausgehende Licht fällt durch einen Strahlteiler, wobei ein Teil den Strahlteiler ungehindert passiert und auf eine Photodiode fällt, ein Teil wird reflektiert und fällt auf den zu untersuchenden Bildsensor. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete

⁷⁴<http://www.qioptiq.com>

⁷⁵Mittels eines elektronischen Regelkreises wird der Kühlkörper der LED unter Berücksichtigung der thermischen Verluste der LED konstant auf eine Temperatur von 34 °C geheizt.

Strahlteiler hat dabei ein Verhältnis von etwa 90 % Transmission zu 10 % Reflexion, sodass auf den Sensor nur etwa ein Zehntel der Lichtmenge fällt, die mit der Photodiode gemessen wird. Dadurch kann die Photodiode in einem linearen Arbeitsbereich deutlich oberhalb des Dunkelrauschens betrieben werden. Da der Winkel des Strahlteilers das Teilverhältnis maßgeblich beeinflusst, ist im Rahmen jeder Messung auch das Teilverhältnis unter Zuhilfenahme der Photodiode zu bestimmen und als Korrekturfaktor in die Berechnung der Helligkeit am Bildsensor mit einzubeziehen. Die Abmessungen der Blende hinter dem Diffusor, Breite und Winkel des Strahlteilers sowie die Länge der Tuben, die den Abstand zwischen Sensor und Strahlteiler bestimmen, sind im Hinblick auf eine optimal homogene Ausleuchtung des Bildsensors gemäß der Norm *EMVA 1288* [135] ausgelegt. Die Anordnung der Komponenten ist Abbildung 12 zu entnehmen.

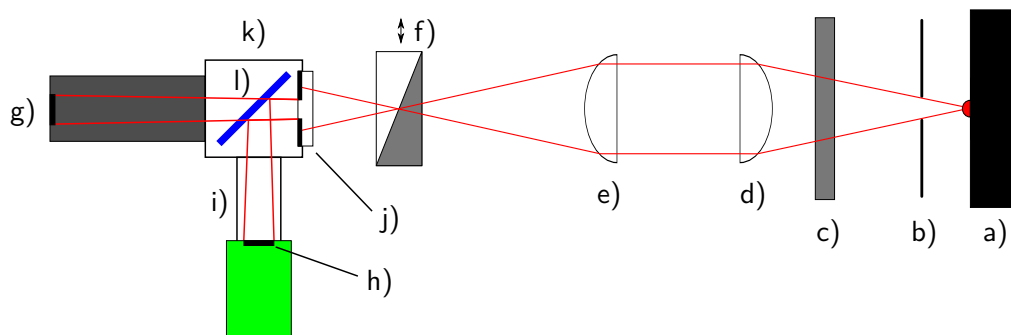


Abbildung 12: Messaufbau auf mit Graukeil auf Microbank

- a) Rote Power-LED mit einer Dominantwellenlänge von 624 nm bei einer Halbwertsbreite von 20 nm auf einem temperaturstabilisierten Kühlkörper
- b) Lochblende mit 5mm Durchmesser
- c) ND-Filter, je nach Messbereich mit optischer Dichte von 0, 0,3 oder 1,7
- d) Plankonvexe Linse mit f50
- e) Plankonvexe Linse mit f30
- f) Mittels Mikrometerschraube verschiebbarer Graukeil mit gegenläufig verkittetem Ausgleichskeil aus Klarglas mit einer Transmission von 1 bis 80 %
- g) Referenz-Photodiode zur Messung der Beleuchtungsstärke im Würfel
- h) Bildsensor des zu vermessenden Kamerasystem
- i) Tubus-Adapter Microbank - C-Mount

- j) Diffusor mit eingeschraubter Ringblende (Blendendurchmesser 15mm)
- k) Microbankwürfel
- l) Strahlteiler mit einem Teilverhältnis von ca. 10:90 (Reflexion:Transmission)

Es ist deutlich ersichtlich, dass sich der Aufbau im Wesentlichen in zwei Abschnitte teilt: Der Teil zwischen der LED und der Mattscheibe basiert im Wesentlichen auf einer einfachen Abbildungsoptik; hinter der Mattscheibe hingegen liegt ein diffuser Strahlengang vor. Während die Abbildungsoptik, da sie gegen Streulicht bei deutlich von der optischen Achse abweichenden Winkeln relativ unempfindlich ist, nur mit einer maßgefertigten provisorischen Abschirmung aus BlackWrap⁷⁶ gegen Störlichteinfall geschützt ist, wurde der gesamte Aufbau im Bereich der diffusen Beleuchtung zusätzlich mittels eines Microbankwürfels mit Blindstopfen und einem Tubussystem zum Anschluss der Photodiode und der zu vermessenden Kamera gekapselt. Um in diesem Bereich des Aufbaus parasitäre Reflexionen zu vermeiden sind sämtliche Innenflächen mattschwarz lackiert oder eloxiert und größere Flächen im Strahlteilerwürfel und an den Innenwandungen der Tuben zusätzlich mit schwarzem Samt ausgeschlagen (vgl. [163]). Es konnte im Rahmen von Vorversuchen gezeigt werden, dass Reflexionen durch ein Fehlen derartiger Maßnahmen das Messergebnis um Größenordnungen verfälschen können.

Der mit einer Stellfläche von nur 35 cm × 15 cm sehr kompakte Aufbau ermöglicht eine reproduzierbare Messung der OECF, wobei durch Austausch der LED unterschiedliche Wellenlängen und durch Wechseln der ND-Filter Beleuchtungsstärken im Umfang mehrerer Größenordnungen am Bildsensor des zu vermessenden Kamerasystems erreicht werden können. Bei Verwendung des Messaufbaus für Kameras mit deutlich geringerer Lichtempfindlichkeit kann der Strahlteiler gegen eine Variante mit einem symmetrischen Teilverhältnis ausgetauscht werden, um einen weiteren Betrieb der Photodiode in ihrem linearen Kennlinienbereich zu gewährleisten. Da der verschiebbare Graukeil eine sehr präzise stufenlose Abschwächung des Lichts ermöglicht, kann die Beleuchtungsstärke am Bildsensor sehr präzise reguliert werden, wobei die Messung der Beleuchtungsstärke pseudokoaxial zum Bildsensor erfolgt. Dies ermöglicht in Verbindung mit der um einen konstanten Faktor reduzierten Beleuchtungsstärke an der Photodiode im Verhältnis zum Bildsensor die präzise Bestimmung sehr kleiner Beleuchtungsstärken am Bildsensor in einem linearen und rauscharmen Kennlinienbereich der Photodiode, die mitsamt Verstärker auch in diesem Fall der Entwicklung des Aufbaus gegen die im Kontext des Referenzaufbaus genannten Messgeräte abgeglichen wurde. Entsprechende Abgleichmessungen sind bei jeder Variation am Strahlteiler sowie bei einem Wechsel der Wellenlänge unabdingbar, werden jedoch im Rahmen jeder Messung empfohlen. Das Einsetzen von ND-Filtern und die Variation der Helligkeit mittels des verschiebbaren Graukeils berühren das Teilverhältnis nicht, weshalb kein erneuter Abgleich notwendig ist, solange die Photodiode in ihrem linearen Kennlinienbereich⁷⁷ betrieben wird. Zu Beginn und nach Abschluss jeder Messung ist für die Photodiode und den Photodiodenverstärker ein Dunkelabgleich vorzunehmen, wobei beide Werte abgesehen von

⁷⁶mattschwarz beschichtete Aluminiumfolie aus der Beleuchtungstechnik für Bühne, Film und Fernsehen

⁷⁷Dieser ist im Vorversuch experimentell zu bestimmen.

Rauschen konstant sein müssen, damit für die gesamte Messung eine stabile Helligkeitsreferenz angenommen werden kann. Obwohl für den Betrieb des Messaufbaus keine vollständige Abdunklung des Labors notwendig ist, wird dennoch empfohlen, die Umgebungshelligkeit bestmöglich zu reduzieren.

Im Rahmen der Entwicklung des Messsystems wurde anhand persönlicher Erfahrung und unter Berücksichtigung entsprechender Hinweise in [109] [163] [164] [165] und [166] eine Liste potentieller Fehlerquellen ermittelt, deren Einfluss beim Aufbau des Systems im Labor durch geeignete Gegenmaßnahmen eliminiert oder zumindest stark reduziert wurde. Fehler durch Reflexionen an den polierten Führungsstangen im Bereich der Abbildungsoptik konnten durch den Einsatz von Blenden zur Begrenzung des Strahlenbündels vermieden werden. Reflexionen im Teil der diffusen Ausleuchtung wurden wie oben beschrieben durch Auskleidung sämtlicher Wandungsflächen mit stark lichtabsorbierenden Materialien entgegengewirkt und die Wirksamkeit der Maßnahmen durch wiederholte Messung des Reststreulichts nachgewiesen. Im Vorversuch konnte gezeigt werden, dass sich Unregelmäßigkeiten und Fertigungstoleranzen in den ND-Filtern, im Linsensystem, im verschiebbaren Graukeil, im Diffusor und im Strahlteiler nur marginal auswirken. Durch Verwendung hochwertiger Komponenten konnte die Auswirkung der Bauteiltoleranzen soweit reduziert werden, dass entsprechende Nebeneffekte messtechnisch nicht mehr nachweisbar waren. Der Einfluss von Polarisierungseffekten⁷⁸ durch lineare Polarisation des am schräggestellten Strahlteiler reflektierten Lichts kann sich in Form eines proportionalen Fehlers auswirken, der sich im hier vorgeschlagenen Aufbau prinzipbedingt nicht verhindern lässt. Der Einsatz eines Depolarisators direkt vor dem Bildsensor könnte hier Abhilfe schaffen, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, da für die Pixel des derzeit im zu vermessenden Kamerasystem verbauten sCMOS-Bildsensors im Vorversuch keine signifikante Empfindlichkeit gegenüber der Polarisationsrichtung bei linear polarisiertem Licht festgestellt wurde. Eventuelle Dispersionseffekte im Linsensystem und im Graukeil sowie Beugungseffekte durch die Blenden im Strahlengang konnten in diesem Aufbau messtechnisch nicht nachgewiesen werden und sind daher zu vernachlässigen.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass sich das Verfahren aufgrund zu erwartender chromatischer Aberrationen im Linsensystem und in geringerem Maße im Graukeil sowie aufgrund der zu erwartenden chromatischen Dispersion am Strahlteiler nicht für Messungen mit polychromatischem Licht eignet. Da dieser Messaufbau in Anlehnung an die Norm *EMVA 1288* [135] entwickelt wurde, die monochromatische oder spektral schmalbandige Lichtquellen vorsieht, fällt dies nur geringfügig ins Gewicht. Messungen in Anlehnung an *ISO14524* [133] sind jedoch nicht möglich, da hier eine Beleuchtung mit Weißlicht vorgesehen ist.

5.4.4 Durchführung und Auswertung der Messung

Vorbereitung der Messung

Die Messung der OECF erfolgt für eine bessere Vergleichbarkeit beider Messverfahren unter gleichen Umweltbedingungen in einem verdunkelten Labor bei einer Raumtemperatur von

⁷⁸Oft sind die Photodioden der Pixel eines Bildsensors bei kleinem Pixelpitch im Bereich weniger μm in geringem, jedoch nicht vernachlässigbarem Maße auf die Polarisationsrichtung von vollständig oder partiell linear polarisiertem Licht empfindlich.

$23 \pm 2^\circ\text{C}$. In beiden Fällen wird dieselbe Lichtquelle⁷⁹ und dieselbe Photodiode mit dem dazugehörigen Photodiodenverstärker verwendet, um Abweichungen der Messwerte durch Bauteiltoleranzen bestmöglich ausschließen zu können. In beiden Fällen ist der gesamte Messaufbau einschließlich des Kamerasystems mindestens zwei Stunden vor Beginn der Messung in Betrieb zu nehmen, um ein thermisches Gleichgewicht aller Komponenten bei Beginn der Messung zu gewährleisten, wobei die Temperatur des Kamerasystems als langsamstes Element als Referenz genommen werden kann. Sobald die Temperatur des Kamerasystems am Bildsensor 35°C erreicht, kann mit der Messung begonnen werden, da diese Temperatur im Langzeitversuch empirisch für den Prototypen der *HiDyV* als thermischer Gleichgewichtspunkt ermittelt wurde. Bei jeder Modifikation des Kamerasystems muss der thermische Gleichgewichtspunkt entsprechend erneut bestimmt werden. Vor Beginn und nach Abschluss der eigentlichen Messung sind mit abgedecktem Bildsensor Dunkelbildserien zu erstellen und zu vergleichen, um eine Drift des Dunkelstroms ausschließen zu können. Weiter ist für die vollständig abgedunkelte Photodiode die Dunkeloffsetspannung $U_{\text{Dunkeloffset}}$ am Ausgang des Photodiodenverstärkers zu bestimmen.

Am Kamerasystem wurde folgende Betriebsparameter eingestellt:

Parameter	Wert
Shutter Mode	Rolling Shutter
Trigger	Free-Run
Framerate	20fps
ROI	gesamter Sensor (1920px x 1080px)
Belichtungszeit	40 ms
HDR-Modus	manuell, Highgain Readout
Highgain-Verstärkung	30
Lowgain-Verstärkung	2
ADC-Rampe	intern
Firmware-Version	0.0.9

Im Falle des Referenzaufbaus sind vor Beginn der eigentlichen Messreihe mit der Photodiode bei mittels der LED moderat ausgeleuchteter Ulbricht-Kugel die Korrekturfaktoren für die winkelabhängige Abschwächung des Photodiodenmesswerts gegenüber der an der späteren Position des Bildsensors zu messenden Beleuchtungsstärke und für die Abschwächung der Beleuchtungsstärke am Bildsensor durch den verwendeten ND-Filter zu bestimmen. Diese Korrekturfaktoren können zusammengefasst werden, sodass bei der Auswertung nur noch ein Faktor mit dem Messwert der Photodiode multipliziert werden muss, um die äquivalente Beleuchtungsstärke am Bildsensors zu erhalten.

Im Falle des Aufbaus auf der optischen Bank muss entsprechend das Teilverhältnis des Strahlteilers bestimmt werden, um bei der Auswertung durch Multiplikation des Photodiodenmesswerts mit dem Korrekturfaktor die äquivalente Beleuchtungsstärke am Bildsensors zu

⁷⁹Rote Power-LED mit einer Dominantwellenlänge von 624 nm bei einer Halbwertsbreite von 20 nm. Das Spektrum kann Appendix B entnommen werden.

erhalten.

In beiden Fällen kann so die Beleuchtungsstärke am Bildsensor $W_{Bildsensor}$ aus der Beleuchtungsstärke an der Position der Photodiode $W_{Photodiode}$ berechnet werden.

$$W_{Bildsensor} = \beta \cdot W_{Photodiode}$$

mit β als Korrekturfaktor definiert als Verhältnis

$$\beta = \frac{U_{Bildsensor} - U_{Dunkeloffset}}{U_{Photodiode} - U_{Dunkeloffset}}$$

und mit $U_{Bildsensor}$ als Spannung am Ausgang des Photodiodenverstärkers bei Messung an der späteren Position des Bildsensors des zu vermessenden Kamerasystems und $U_{Photodiode}$ als Spannung am Ausgang des Photodiodenverstärkers bei Messung an der späteren Position der Photodiode im Messaufbau für während den Referenzmessungen konstante Lichtverhältnisse.

Durchführung der Messung

Bei der eigentlichen Hauptmessung wird für jeden zu untersuchenden Helligkeitswert die gewünschte Beleuchtungsstärke eingestellt, im Fall des Referenzaufbaus durch Einstellen des LED-Stroms, im Falle des Aufbaus auf der optischen Bank durch Verschieben des Graukeils, wobei die Größenordnung des Helligkeitsbereichs durch Einsetzen eines ND-Filters zu wählen ist. Dabei ist die Beleuchtungsstärke mittels der Spannung am Ausgang des Photodiodenverstärkers zu bestimmen. Unter Verwendung des Pleora GEV-Players⁸⁰ wurden 20 aufeinanderfolgende Frames als binäre Rohdaten auf die Festplatte eines Computers gestreamt. Um Transienteneffekte zu Beginn und am Ende der Datenübertragung zu vermeiden wurden die ersten 5 Frames und die letzten 5 Frames verworfen. Die Binärdaten der verbleibenden 10 Frames wurden mithilfe eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Formatkonverters eingelesen, pixelweise arithmetisch gemittelt⁸¹ und das Ergebnis als monochrome Tiff-Datei mit 12 bit Farbtiefe abgespeichert. Die Dateinamen und die zugehörigen Ausgangsspannungen des Photodiodenverstärkers sind für die weitere Auswertung in einer Tabelle zu erfassen. Dieses Procedere wird für alle Helligkeitswerte wiederholt.

Auswertung der Messergebnisse

Nach Abschluss der Messung wird mittels eines Matlab-Skripts für jeden Punkt der OECF aus den notierten Messwerten der Spannung am Ausgang des Photodiodenverstärkers unter Verwendung des zuvor ermittelten Korrekturfaktors k und unter Berücksichtigung des zuvor gemessenen Dunkeloffsets und der im Vorversuch für die verwendete Wellenlänge ermittelten

⁸⁰Software zum Anzeigen und Aufzeichnen von Bilddaten, die über eine GigE-Vision-Schnittstelle an einen Computer übertragen werden. Im Rahmen des Experimentalteils dieser Arbeit wurde die Version 3.1.3.2486 verwendet.

⁸¹Dies entspricht der in der *EMVA 1288* [135] empfohlenen Berechnung des arithmetischen Mittels über der Zeit zur Reduktion zeitlichen Rauschens.

Umrechnungsfaktoren γ in $\text{W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$ die äquivalente Beleuchtungsstärke $W_{\text{Bildsensor}}$ am Bildsensor errechnet. Es gilt

$$W_{\text{Bildsensor}} [\text{W m}^{-2}] = (U_{\text{Photodiode}} - U_{\text{Dunkeloffset}}) \cdot \beta \cdot \gamma$$

Für jedes Messverfahren wird in einem OECF-Schaubild darüber der Mittelwert der Pixelwerte aus 10 zufällig gewählten Pixeln und in einem weiteren Schaubild für jedes der 10 Pixel eine individuelle OECF gegen die berechnete äquivalente Beleuchtungsstärke am Bildsensor abgetragen.

Die Berechnung von Dunkelrauschen und Dynamikumfang erfolgt gemäß der in der Norm *EMVA 1288* [135] vorgeschriebenen Formeln.

5.4.5 Bewertung der Messergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Messungen mit beiden Aufbauten mehrfach wiederholt und gegeneinander kreuzvalidiert, wobei für den Referenzaufbau eine hinreichende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und für den Aufbau auf der optischen Bank eine exzellente Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden konnte. Der Vergleich beider Messverfahren zeigte im Rahmen der erwarteten Messungenauigkeiten⁸² übereinstimmende Ergebnisse.

Im Folgenden sollen anhand des in Abbildung 13 wiedergegebenen Plots der digitalen Ausgangswerte des ADC für den im Highgain-Modus betriebenen sCMOS-Bildsensor der *HiDyV* über der Beleuchtungsstärke am Bildsensor für eine monochromatische Beleuchtung bei 624 nm exemplarisch die Ergebnisse einer der durchgeführten Messungen diskutiert werden. Sämtliche darüber hinaus im Rahmen der Auswertung der durchgeführten Messungen entstandene Plots können Appendix A entnommen werden; alle Original-Messdaten sowie die Versuchsprotokolle sind in der Abteilung Bildsensorik am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS archiviert und können dort von den Prüfern dieser Arbeit eingesehen werden. Für den zu vermessenden Highgain-Kanal wurde zudem ein Dunkelrauschen $\ll 1 \text{ DN}$ ⁸³ und eine Dynamik von 65 dB ermittelt. Im HDR-Automatikmodus des verbauten Bildsensors ist durch die Kombination der Daten des Highgain-Kanals mit den Daten des Low-Gain-Kanals ein erreichbarer Dynamikumfang des Kamerasystems von 90 dB zu erwarten, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr messtechnisch untersucht werden konnte.

Die Messwerte entsprechen im Allgemeinen den Erwartungen und weichen nur in wenigen Punkten von den Sollwerten ab. Der verbaute Bildsensor weist - wie vom Hersteller beworben - ein sehr niedriges Dunkelrauschen auf, was auf die Architektur der Pixelzellen und ein fortschrittliches Design der Analogkomponenten auf dem Bildsensor zurückzuführen ist. Im Bereich mittlerer Beleuchtungsstärken verläuft die OECF in guter Näherung linear, für hohe Beleuchtungsstärken tritt erwartungsgemäß eine Sättigung ein. Bei steigender Beleuchtungsstärke wurde zudem erwartungsgemäß ein zunehmendes Photon Shot Noise ge-

⁸²Eine umfassende Fehlerrechnung hätte den Rahmen dieser Arbeit deutlich gesprengt und bleibt daher zukünftigen Untersuchungen vorbehalten. Die Größenordnung der zu erwartenden Präzision konnte jedoch anhand von Erfahrungswerten der Ingenieure des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS und anhand früherer Messprotokolle geschätzt werden.

⁸³Für Werte < 1 kann das Rauschen nicht exakt bestimmt werden [135].

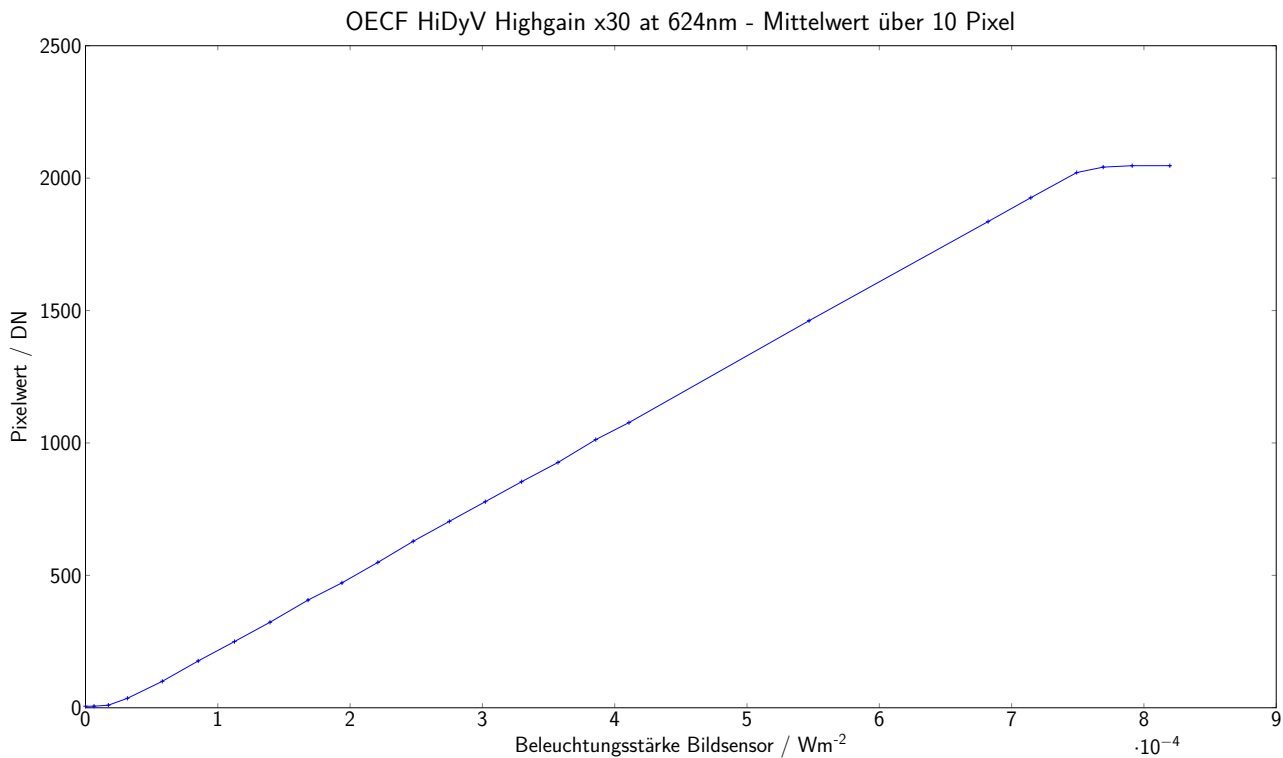


Abbildung 13: OECF *HiDyV*, gemessen mit Aufbau auf optischer Bank

messen, welches sich physikalisch bedingt nicht unterdrücken lässt. Beim Vergleich mehrerer Einzelpixelkennlinien fällt deutlich der zu erwartende Gain- und Offsetfehler auf. Bei Anwendung einer entsprechenden algorithmischen Korrektur können diese prinzipbedingt bei allen CMOS-Bildsensoren auftretenden Fehler vollständig kompensiert werden. Der sCMOS-Bildsensor kann daher in diesem Kennlinienabschnitt schon zum derzeitigen Entwicklungsstand des Prototyps für den Praxiseinsatz als Industriekamerasystem oder auch im Broadcast als tauglich angesehen werden.

Im Bereich niedriger Beleuchtungsstärken zeigt sich entgegen der erwarteten linearen Kennlinie mit einem individuellen Offsetfehler für den Dunkelwert jedes Einzelpixels allerdings eine starke Abflachung der Kennlinie bis zu einem globalen Offsetwert von 6 DN. Dieses Verhalten lässt sich ohne weitere Untersuchungen nicht erklären. Die wahrscheinlichste Ursache scheint nach ersten Voruntersuchungen in einer Nichtlinearität der Referenzspannungsrampe des on-Chip-ADC⁸⁴ begründet zu sein. Da diese Spannung nicht direkt gemessen werden kann, muss in weiteren Versuchen durch Variation der externen Beschaltung, etwa der Einspeisung einer externen Referenzspannungsrampe, das Einspeisen einer Bias-Spannung in die Spaltenverstärker oder eine Modifikation der Sensoransteuerung untersucht werden, ob der beobachtete Effekt tatsächlich auf den ADC oder auf das Design der Pixelzellschaltung, eine der verschiedenen Verstärkerstufen oder einen Fehler in der digitalen Schaltung der Steuer-

⁸⁴implementiert als Single-Slope-ADC

logik des Bildsensors zurückzuführen ist. Obwohl die für entsprechende Untersuchungen notwendigen Baugruppen bereits weitgehend in der aktuellen Hardwarerevision des Prototyps vorgesehen sind, ist die Untersuchung des Effekts sehr zeitaufwändig. Neben etlichen Modifikationen der Sensorbeschaltung müssen dabei verschiedene Baugruppen zunächst in Betrieb genommen und auf korrekte Funktion überprüft werden und anschließend die Auswirkungen der Modifikationen der Betriebsparameter des Bildsensors gemessen und analysiert werden. Bei den dazu notwendigen Modifikationen sind stets Hardware und Firmware aufeinander abzustimmen, da bestimmte Betriebszustände wie unzulässige Spannungspegel oder ungültige digitale Steuersignale zu einer sofortigen Zerstörung des Bildsensors führen können. Derartige Maßnahmen sind sehr zeitaufwändig und können im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden.

Aufgrund der Nichtlinearität der Sensorkennlinie ist das Kamerasystem zum derzeitigen Stand der Entwicklung nicht einsatzfähig; da die Abweichung sich in Form einer starken Linkskrümmung der OECF in besagtem Bereich manifestiert, ist dieser Effekt aufgrund der Unterbestimmung der Variablen für eine Korrekturgleichung auch nicht oder nur unzureichend algorithmisch korrigierbar.

5.4.6 Vergleich beider Messverfahren

Es konnte gezeigt werden, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messverfahren für die Erfassung der OECF von Kamerasystemen mit sehr lichtempfindlichen Bildsensoren über weite Dynamikbereiche geeignet ist. Im Vergleich mit dem Referenzverfahren konnten keine systematischen Fehler festgestellt werden, wobei der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Aufbau gegenüber dem Referenzaufbau verschiedene Vorteile in Bezug auf Präzision und Robustheit besitzt.

Gegenüber dem Referenzverfahren zeigte sich der entwickelte Aufbau mit Strahlteiler vor allem gegenüber parasitärem Streulicht als deutlich robuster. Zusammen mit der deutlich reduzierten Stellfläche des Aufbaus muss das Optiklabor daher nicht wie beim Referenzaufbau vollständig abgedunkelt werden, was zu einer effizienteren Ausnutzung der Laborkapazitäten und dadurch letztlich zu einem deutlich wirtschaftlicheren Arbeiten führt. Durch eine beliebig präzise Auflösung der Helligkeitsstufen ohne Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Lichts sowie die Möglichkeit zur einfachen Variation der Wellenlänge durch Einsatz einer anderen LED lässt sich der Aufbau in weiten Teilen an die Bedürfnisse unterschiedlicher Kamerasysteme und Bildsensoren anpassen. Bei der Verwendung größerer Bildsensoren sind gegebenenfalls Modifikationen im Bereich der diffusen Beleuchtung, etwa durch Verwendung eines größeren Strahlteilers und der Verwendung eines Adapters mit einem entsprechend größeren Innendurchmesser, vorzunehmen, was jedoch durch den modularen Aufbau mittels des Microbank-Systems problemlos umsetzbar ist.

Beide Verfahren lassen sich bei Bedarf vollständig automatisieren, was die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf zukünftige Weiterentwicklungen nochmals deutlich steigert.

5.5 Beurteilung der Messaufbauten im Bezug auf Broadcastanwendungen

Wie bereits mehrfach erwähnt können Messaufbauten zur Untersuchung von Kamerasystemen unter anderem in Laboraufbauten und Aufbauten zur Durchführung der täglichen Messungen zur Justage und zur Schnellbeurteilung der gesamten Kamerazüge im Broadcast unterschieden werden. Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Messaufbauten können dabei recht eindeutig als Laboraufbauten für Forschungszwecke eingeordnet werden; besonders beim Referenzaufbau stellt die hohe Empfindlichkeit gegenüber optischen und mechanischen Störeinflüssen in der Broadcastpraxis ein nichttrivial lösbares Problem dar.

Die hohe erreichbare Präzision der beiden Aufbauten ist in der Entwicklung von Kamerasystemen unabdingbar, im Broadcastalltag in der Regel aber nicht gefordert oder sogar unerwünscht. Hier werden Kamerasysteme in der Regel schon für eine erste Beurteilung mittels eines abgefilmten Testcharts als Schnelltest untersucht. Dabei ermöglicht der Einsatz von Videomesssystemen⁸⁵ als Senke der Signalverarbeitungskette eine Identifikation der meisten praxisrelevanten Probleme wie Nichtlinearitäten⁸⁶, Farbraumprobleme oder Falschpegel für Schwarz- und Weißpunkt [167], entsprechende Verfahren sind in [134] festgehalten. Derartige Messungen besitzen für die schnelle Beurteilung und den Vergleich von Kamerasystemen in der Broadcastpraxis einige Vorteile: sie lassen sich schnell und mit meist standardmäßig vorhandenen Geräten durchführen und liefern, sofern dafür Multifeature-Testcharts [168] verwendet werden, mit verhältnismäßig geringem Aufwand auch unter Zeitdruck sehr schnell Anhaltspunkte zur Beurteilung des gesamten Kamerazugs einschließlich Objektiv, Bildverarbeitung und Signalübertragung. Da hier oft eine qualitative Aussage beziehungsweise ein qualitativer Vergleich von Systemen ausreicht und keine reproduzierbare quantitative Messung notwendig ist, werden derartige Messverfahren wohl weiter bestehen bleiben und gemäß den Anforderungen sukzessive erweitert werden; da beispielsweise die Standard-Testcharts nach *ISO14524* keinen ausreichenden Dynamikumfang für moderne Kamerasysteme vorsehen, werden mittlerweile modifizierte Charts angeboten [169]. Zur Messung der Farbwiedergabe können entweder entsprechende Testcharts⁸⁷ oder Spezialkonstruktionen in Anlehnung an [170] verwendet werden, die einen exakt reproduzierbaren Tristimulus erzeugen können, wobei auch hier in der Praxis meist der einfachere Aufbau mit dem Colorchecker bevorzugt wird.

Der Einfluss einer adaptiven Signalverarbeitung, etwa durch kantenerhaltendes Demosaicking, Farbkorrekturalgorithmen [78], Rauschunterdrückung [83], Korrekturen von Objektiv-Artefakten [171] oder auch Kompressionsartefakten [98] können bei der Messung mittels abgefilmter Testcharts zwar nicht detailliert untersucht werden, tragen aber zu einer deutlich realistischeren Simulation der Einsatzbedingungen bei. Dies ist insofern von Bedeutung, dass bei kommerziell erhältlichen Kamerasystemen für Broadcastanwendungen in der Regel nur die Signale am Ende der gesamten Signalverarbeitungskette zur Verfügung stehen und daher nur die Eigenschaften des Gesamtsystems erfasst werden können.

Der Einfluss des Objektivs durch Vignettierung und Verzerrung sowie der Einfluss von Streulicht sind zwar im Sinne einer reproduzierbaren Messung unerwünscht, können jedoch im

⁸⁵An dieser Stelle seien als bekannteste Varianten der Wave-Form-Monitor und das Vektorscope genannt.

⁸⁶unter Berücksichtigung der definierten Abweichungen durch Gammakorrektur

⁸⁷Am weitesten verbreitet ist dabei der *Color Checker SG* der Firma X-RITE.

Einzelfall auch hier zu einer realistischeren Repräsentation der Einsatzbedingungen führen, wobei für HDR-Kamerasysteme noch kaum belastbare Erfahrungswerte vorliegen. Um einen entsprechenden Dynamikbereich abbilden zu können wurden erste Testcharts entwickelt [147], die allerdings noch etliche Schwachstellen aufweisen.

Die im Broadcast verbreiteten Systeme zur technischen Beurteilung von Kamerasystemen sind wiederum für eine Anwendung in Forschung und Entwicklung weitgehend ungeeignet, da sie nicht die nötige Präzision und Reproduzierbarkeit erreichen. Auch kann das Zusammenspiel der verschiedenen Baugruppen und verschiedener Komponenten der Signalverarbeitung nicht hinreichend genau untersucht werden. Es zeigt sich dabei eine große Divergenz zwischen den Anforderungen und dem finanziellen Budget, welches einerseits Entwicklungsabteilungen und andererseits den Bildtechnik-Abteilungen kleiner und großer Sendeanstalten zur Verfügung steht.

Im Falle der beiden im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Aufbauten sprechen vor allem die relativ hohen Anschaffungskosten der optischen Komponenten der Messsysteme gegen eine alltägliche Verwendung im Broadcast. Des weiteren eignen sich die vorgestellten Aufbauten lediglich zur Erfassung der OECF, nicht aber etwa zur Messung der MTF oder anderer für den Broadcast relevanten Kenngrößen, weshalb die hier vorgestellten Aufbauten wohl in dieser Form der Forschung und Entwicklung vorbehalten bleiben.

5.6 Ausblick

In der Zukunft könnten eventuell Algorithmen zur Bildqualitätsbeurteilung [172] [173] die Lücke zwischen reinen Labormessungen und den Messungen im Rahmen der täglichen Arbeit eines Bildtechnikers im Broadcast schließen. Dabei würden zuvor definierte Testszenen aufgenommen und anschließend mittels eines Auswertungsalgorithmus die Bildqualität am Ende der Signalkette unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien beurteilt. Durch Einbeziehung psychophysischer Modelle [18] in die Evaluierung der Ergebnisse könnte eine praxisnahe Beurteilung der vom Zuschauer am Ende tatsächlich wahrgenommenen Bildqualität erreicht werden. Für eine Kosten-Nutzen-optimierte Weiterentwicklung der einzelnen Komponenten der gesamten Signalkette von der Quelle, in diesem Falle der Optik des Kamerasystems, bis hin zur Senke, in diesem Falle das Display des Konsumenten, könnte so eine Metrik zur Qualitätsbeurteilung für komplette Signalketten entwickelt werden. Entsprechende Ansätze werden bereits seit einigen Jahren entwickelt, wenn auch meist eher im Kontext der Entwicklung von verlustbehafteten Kompressionsalgorithmen [174] [175]. Dabei könnten auch die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten der Kette im Endergebnis betrachtet werden, etwa der Einfluss des Demosaicking-Algorithmus auf die Qualität der Farbkorrektur und der Rauschunterdrückung.

Die sich bei einem derartigen Verfahren stellende Frage, wie exakt das Modell der Realität eines derartigen System zu sein hat und in welchem Ausmaß ein derartiges System Effekte wie die Alterung oder Erkrankungen des Auges zu berücksichtigen hat, kann an dieser Stelle nicht beantwortet, sondern nur als Gegenstand sowohl schon bisher geleisteter als auch aktueller und zukünftiger Forschung zur Diskussion gestellt werden. Eine ausführliche Diskussion dieser Problematik scheint durchaus lohnenswert, da bisherige Ansätze zur Modellierung der visuellen Wahrnehmung des Öfteren im Nachhinein gezeigt haben, dass eine vorschnelle oder

zu radikale Anwendung von Ockhams Rasiermesser leicht zu einer zu starken Vereinfachung führen kann, die später technologischen Weiterentwicklungen im Wege steht [18]. Neben der Diskussion um die Präzision des Modells stellt wohl die Konstruktion einer universellen, transportablen und bezahlbaren Referenzszenerie oder eines sowohl qualitativ hochwertigen als auch für die Praxis repräsentativen Teststimulus in Form eines Testcharts die größte Herausforderung bei der Entwicklung eines derartigen Testverfahrens dar, da es eine stabile und universelle Referenz am Eingang der gesamten Signalkette bilden muss [176]. Aufgrund des hohen Konkurrenzdrucks der Anbieter und der in vielen Fällen sicherlich auch bewusst verschwiegenen oder verschleierte Mängel von Komponenten der Signalverarbeitungskette ist jedoch in absehbarer Zukunft die Entwicklung und Etablierung einer Metrik zur Betrachtung und individuellen objektiven Qualitätsbeurteilung der verschiedenen Systemkomponenten im Kontext einer gesamtsystematischen Betrachtung nicht zu erwarten. Auch ist die Einführung einer verbindlichen Metrik zur Etablierung einer herstellerübergreifenden objektiven Qualitätsbeurteilung der Einzelkomponenten und auch der Gesamtsysteme über die bestehenden Normen hinaus eher unwahrscheinlich. Es ist anzunehmen, dass eine derartige Vergleichbarkeit vor allem seitens der Hersteller von Kamerasystemen aus unternehmensstrategischen Gründen im Allgemeinen eher unerwünscht ist, da sie der Werbestrategie der meisten Hersteller in weiten Teilen widerspricht. Bezüglich der bereits bestehenden Normen ist einerseits durch den permanenten technischen Fortschritt seitens der Hersteller und andererseits durch das nur recht träge Nachziehen der Standardisierungskomitees bei der Revision und Anpassung alter Normen an den jeweiligen Stand der Technik oder der Neuverabschiedung von Normen auch zukünftig zu erwarten, dass sich, zumindest in absehbarer Zeit, auch weiterhin keine verbindliche Vereinheitlichung und Referenzierung durchsetzen wird, die den Stand der Technik umfassend abzubilden vermag oder sogar eventuellen zukünftigen Entwicklungen vorgreift.

5.7 Zusammenfassung

Anhand der recherchierten Literatur konnte nachgewiesen werden, dass die derzeit gängigen Normen zur Beurteilung von Kameras und Kamerasystemen zur Beurteilung von HDR-Kamerasystemen weder für Broadcastanwendungen noch für Entwicklungszwecke geeignet sind. Zusätzlich konnte durch eine Internetrecherche bei einer Auswahl bekannter Hersteller von Kamerasystemen für Broadcast und Film gezeigt werden, dass in den Datenblättern der Kameras keine Spezifikationen über Messverfahren genannt werden und eine Kennzeichnung der referenzierten Normen unterbleibt. Es wurde eine Auswahl von wichtigen technischen Kenngrößen genannt, die zu einer Bewertung eines Kamerasystems herangezogen werden können. Es wurde erläutert, warum die genannten Kenngrößen nur eine Auswahl aus einer großen Übermenge an möglichen Optionen darstellt und dass sie keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Für die Labormessung der OECF eines HDR-Kamerasystems wurde ein neuartiger Messaufbau vorgeschlagen. Die Vor- und Nachteile des Aufbaus wurden im Vergleich zu einem Referenzsystem ausführlich diskutiert. Mit beiden Aufbauten wurden am Prototypen des HDR-Kamerasystems *HiDyV* des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS exemplarisch Messungen durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse der Messungen wurden diskutiert

und bewertet und die weitere Vorgehensweise für zukünftige Untersuchungen des im Rahmen dieser Arbeit festgestellten unerwünschten Verhaltens des verbauten Bildsensors im Bereich sehr niedriger Beleuchtungsstärken skizziert.

Es wurde weiter die Divergenz zwischen den Anforderungen an Messungen in Form von Laboruntersuchungen in Forschung und Entwicklung und an die Anforderungen im Broadcast am Beispiel der OECF-Messung exemplarisch aufgezeigt und in einem Ausblick Ansätze für die Entwicklung eines gesamtsystematischen Ansatzes aufgezeigt, der durch Berücksichtigung der visuellen Wahrnehmung eine praxisnahe Quantifizierung der Qualität bildgebender Systeme ermöglichen soll. Wegen der hohen Komplexität derartiger Systeme konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch lediglich die Grundidee eines derartigen Systems unter Berücksichtigung der Interessenskonflikte der Hersteller von Kamerasystemen skizziert, jedoch keine konkrete Implementierung vorgeschlagen werden.

6 Quellen

- [1] "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange," Recommendation ITU-R BT.2020, 2012.
- [2] R. Hedtke, "HDTV ... und was kommt danach?" *FKT*, vol. 67, no. 4, 2013.
- [3] M. Schöberl, A. Brückner, S. Föbel, and A. Kaup, "Photometric limits for digital camera systems," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 21, no. 2, pp. 020 501–1–020 501–3, 2012.
- [4] G. Agranov, J. Ladd, T. Gilton, R. Mauritzson, U. Boettiger, X. Fan, and X. Li, "Small pixel development for novel cmos image sensors," *Proc. SPIE*, vol. 7001, pp. 700 108–700 108–13, 2008.
- [5] H. Seetzen, W. Heidrich, W. Stuerzlinger, G. Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, and A. Vorozcovs, "High dynamic range display systems," *ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pp. 760–768, 2004.
- [6] M. Trentacoste, "Photometric Image Processing for High Dynamic Range Displays," Master of Science in Computer Science Thesis, University of British Columbia, 2006.
- [7] Dolby Laboratories Inc., "Dolby Professional Reference Monitor PRM-4220," Whitepaper, 2013.
- [8] M. Lambooj and M. Hammer, "Visibility of crosstalk for high-dynamic range displays," *Proc. SPIE*, vol. 8648, pp. 864 807–864 807–11, 2013.
- [9] F. Kraus, "Arri, Alexa und 4k," *FKT*, vol. 67, no. 4, 2013.
- [10] B. Kinateder, "Dokumentarische Formate," *TELEVIZION*, vol. 25, no. 1, p. 54, 2012.
- [11] F. Wolf, *Alles Doku - oder was? Über die Ausdifferenzierung des Dokumentarischen im Fernsehen*. Düsseldorf: Landesanstalt für Medien Nordrhein-Westfalen (LfM), 2003, Expertise des Adolf Grimme Instituts im Auftrag der Landesanstalt für Medien NRW der Dokumentarfilminitiative im Filmbüro NW, des Südwestrundfunks und des ZDF.
- [12] P. Biber, W. Demonte, W. Ertl, R. Feigl, F. Gierlinger, R. Knör, W. Kuhn, M. Lechner, H. Lichtenthäler, H.-G. Lorfing, T. Palm, and W. Schleheck, "Richtlinien TPRF-HDTV. Technische Richtlinien - HDTV zur Herstellung von Fernsehproduktionen für ARD, ZDF und ORF," 2011.
- [13] E. Tozer, *Broadcast Engineer's Reference Book*. Oxford: Elsevier/Focal Press, 2004.

- [14] R. Brinkmann, *The Art and Science of Digital Compositing*, 2nd ed. Burlington, MA: Elsevier, 2008.
- [15] S. Wright, *Digital Compositing for Film and Video*, 3rd ed. Burlington, MA: Focal Press, 2010.
- [16] H. Thoma, M. de Frutos-Lopez, and J. Auer, "Chroma subsampling for HDR video with improved subjective quality," *Picture Coding Symposium (PCS), 2013*, pp. 345–348, Dec 2013.
- [17] "Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange," Recommendation ITU-R BT.709-5, 2002.
- [18] M. Bass, E. W. Van Stryland, D. R. Williams, and W. L. Wolfe, *Handbook of Optics*. New York: McGraw-Hill Professional, 2000.
- [19] E.-V. Talvala, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy, "Veiling glare in high dynamic range imaging," *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, no. 3, Jul. 2007.
- [20] Institut für Rundfunktechnik IRT, "Wir gestalten ZUKUNFT - mit Ihnen und für Sie! Jahresbericht 2013," 2013.
- [21] P. W. Longhurst, L. Johnson, and N. W. Messmer, "Content metadata enhancement of high dynamic range images," Sep. 12 2013, US Patent App. 2013/0235072 A1.
- [22] J. McCann, "The general solution to HDR rendering," *Proc. SPIE*, vol. 8291, pp. 829 102–829 102–16, 2012.
- [23] W. Fischer, *Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in Theorie und Praxis*, zweite deutsche auflage ed. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010.
- [24] Göbel, Holger, *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik*, 4th ed., ser. Springer-Lehrbuch. Springer, 2011.
- [25] A. Rockett, *The Materials Science of Semiconductors*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [26] I. Martiny, *Integration und Optimierung optoelektronischer Sensoren in Standard-CMOS-Prozessen*, ser. Fortschritt-Berichte VDI.: Elektronik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- [27] O. Yadid-Pecht and R. Etienne-Cummings, *CMOS Imagers: From Phototransduction to Image Processing*, ser. Fundamental Theories of Physics Series. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
- [28] J. Ohta, *Smart CMOS Image Sensors and Applications*, ser. Optical Science and Engineering. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2010.

- [29] C.-C. Wang, "A study of cmos technologies for image sensor applications," Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2001. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1721.1/8214>
- [30] X. Ge, "The Design of a Global Shutter CMOS Image Sensor in 110nm Technology," Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2012.
- [31] Y. Liu, "The Design of a High Dynamic Range CMOS Image Sensor in 110nm Technology," Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2012.
- [32] J. DiBella, M. Andregretti, A. Enge, W. Chen, T. Stanka, and R. Kaser, "Improved sensitivity high-definition interline CCD using the KODAK TRUESENSE color filter pattern," *Proc. SPIE*, vol. 7536, pp. 753 603–753 603–13, 2010.
- [33] G. Q. Zhang and A. v. van Roosmalen, *More than Moore: Creating High Value Micro / Nanoelectronics Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [34] K. Weber, "CMOS: Heute für broadcast bereit," grass valley, Whitepaper, 2012.
- [35] K. Lenhardt, "Optics for digital photography," *Proc. SPIE*, vol. 6834, pp. 68 340W–68 340W–18, 2007.
- [36] B. Hoefflinger, *High-Dynamic-Range (HDR) Vision: Microelectronics, Image Processing, Computer Graphics*, ser. Springer Series in Advanced Microelectronics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
- [37] IDS Imaging Development Systems GmbH, "High Dynamic Range Imaging: Bilder und Sensoren - Grundlagen, Funktionsweise und Anwendung," Whitepaper, 2009.
- [38] A. Theuwissen, "Cmos image sensors: State-of-the-art and future perspectives," *Solid State Device Research Conference, 2007. ESSDERC 2007. 37th European*, pp. 21–27, Sept 2007.
- [39] M. Okincha, "OmniBSI™ Technology Backgrounder," OmniVision Technologies Inc., Whitepaper, 2009.
- [40] Aptina Imaging Corporation, "An Objective Look at FSI and BSI," Whitepaper, 2010.
- [41] A. N. Belbachir, *Smart Cameras*. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2009.
- [42] O. Skorka and D. Joseph, "CMOS digital pixel sensors: technology and applications," *Proc. SPIE*, vol. 9060, pp. 90 600G–90 600G–14, 2014.
- [43] G.-N. Lu, A. Tournier, F. Roy, and B. Deschamps, "1T Pixel Using Floating-Body MOSFET for CMOS Image Sensors," *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 131–147, 2009. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/1/131>
- [44] U. Tietze, C. Schenk, and E. Gamm, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, 14th ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2012.

- [45] Y. Ni, Y. Zhu, and B. Arion, "A 768x576 logarithmic image sensor with photodiode in solar cell mode," *International Image Sensor Workshop*, 2011.
- [46] H. Tian, "Noise Analysis in CMOS Image Sensors," Dissertation, Stanford University, 2010. [Online]. Available: http://www-isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_pub/hui_thesis.pdf
- [47] E. Fossum and D. Hondongwa, "A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors," *Electron Devices Society, IEEE Journal of the*, vol. 2, no. 3, pp. 33–43, May 2014.
- [48] A. G. Stern and D. C. Cole, "High-sensitivity, wide-dynamic-range avalanche photodiode pixel design for large-scale imaging arrays," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 19, no. 2, pp. 021 102–021 102–14, 2010.
- [49] A. ud Din, I. Halin, and S. Shafie, "A review on Solid State time of flight TOF range image sensors," *Research and Development (SCORED), 2009 IEEE Student Conference on*, pp. 246–249, Nov 2009.
- [50] Aptina Imaging Corporation, "Global shutter Pixel Technologies and CMOS Image Sensors - A Powerful Combination," Whitepaper, 2012.
- [51] C. Xu, J. Xu, S. Yao, J. Gao, and Z. Gao, "Design and optimization of four-transistor pixel for low image lag cmos image sensor," *Proc. SPIE*, vol. 8907, pp. 89 070G–89 070G–7, 2013.
- [52] P. Douven, "Multinormkameras und ihre auflösungseigenschaften," in *23. Fachtagung der Fernseh- und Kinotechnischen Gesellschaft (FKTG)*, 2008. [Online]. Available: <http://fachtagungen.fktg.org/fktg/schriftfassung/schriftfassung38.pdf>
- [53] G. C. Holst, "Imaging system fundamentals," *Optical Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 052 601–052 601–10, 2011.
- [54] T. Lule, S. Benthien, H. Keller, F. Mutze, P. Rieve, K. Seibel, M. Sommer, and M. Bohm, "Sensitivity of CMOS based imagers and scaling perspectives," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 11, pp. 2110–2122, Nov 2000.
- [55] S. Vargas-Sierra, E. Roca, and G. Liñán-Cembrano, "Pixel design and evaluation in cmos image sensor technology," *Conference Papers, Design of Circuits and Integrated Systems Conference DCIS 2009*, 2009. [Online]. Available: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/86918/1/Pixel%20design.pdf>
- [56] D. L. Gilblom, S. K. Yoo, and P. Ventura, "Operation and performance of a color image sensor with layered photodiodes," *Proc. SPIE*, vol. 5074, pp. 318–331, 2003.
- [57] H. Bloss, "Die digitale Netzhaut - Bildsensoren für eine digitale Filmkamera," in *Digitale Film - Digitales Kino*, P. C. Slansky, Ed. Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft mbH, 2004, pp. 123–141.

- [58] Jorge L.C. Sanz (ed.), *Image Technology. Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1996.
- [59] H. Shimamoto, T. Yamashita, R. Funatsu, K. Mitani, and Y. Nojiri, "Characteristics of experimental single-chip color HDTV image acquisition system with 8M-pixel image sensor," *Proc. SPIE*, vol. 6502, pp. 65 020Q–65 020Q–9, 2007.
- [60] R. Funatsu, T. Yamashita, K. Mitani, and Y. Nojiri, "Single-chip color imaging for uhdtv camera with a 33m-pixel cmos image sensor," *Proc. SPIE*, vol. 7875, pp. 787 502–787 502–11, 2011.
- [61] B. E. Bayer, "Color Imaging Array," 1976, US Patent 3,971,065.
- [62] S. Junger, W. Tschekalinskij, N. Weber, and A. Wilde, "CMOS Photo Diodes with Integrated Metal-Dielectric Subwavelength Structures as Spectral Selective Elements," in *Proceedings, Second International Conference on Optical Complex Systems (OCS '08)*, March 2008, pp. 89–90.
- [63] D. Lerosé, D. Gabler, and S. Junger, "CMOS-integrated geometrically tunable optical filter," *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 2012 23rd Annual SEMI*, pp. 97–101, May 2012.
- [64] T.-H. Tsai, "Analysis and Design of a Wide Dynamic Range Pulse-Frequency Modulation CMOS-Image Sensor," Dissertation, York University Toronto, Ontario, 2012. [Online]. Available: http://www.cse.yorku.ca/visor/resources/ETsai_PhD_Dissertaion_Final.pdf
- [65] G. Agranov, V. Berezin, and R. Tsai, "Crosstalk and microlens study in a color cmos image sensor," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 1, pp. 4–11, Jan 2003.
- [66] D.-N. Yang, S.-G. Wu, H.-C. Chien, T.-H. Hsu, C.-H. Tseng, J.-S. Lin, J.-J. Chen, C.-H. Lo, C.-Y. Yu, C.-S. Tsai, and C. Wang, "Air-gap guard ring for pixel sensitivity and crosstalk improvement in deep sub-micron cmos image sensor," *Electron Devices Meeting, 2003. IEDM '03 Technical Digest. IEEE International*, pp. 16.5.1–16.5.4, Dec 2003.
- [67] S. Andriani and H. Brendel, "Crosstalk correction technique for single sensor camera provided with Bayer color filter array," *Image Processing (ICIP), 2013 20th IEEE International Conference on*, pp. 2252–2255, Sept 2013.
- [68] M. Aghagolzadeh, A. Abdolhosseini Moghadam, M. Kumar, and H. Radha, "Bayer and panchromatic color filter array demosaicing by sparse recovery," *Proc. SPIE*, vol. 7876, pp. 787 603–787 603–11, 2011.
- [69] K. Hirakawa and P. Wolfe, "Second-generation color filter array and demosaicking designs," *Proc. of SPIE VCIP*, vol. 6822, 2008.

- [70] H. Kuniba and R. S. Berns, "Spectral sensitivity optimization of color image sensors considering photon shot noise," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 18, no. 2, pp. 023 002–023 002–14, 2009.
- [71] H. Shimamoto, T. Yamashita, R. Funatsu, K. Mitani, and Y. Nojiri, "Experimental single-chip color HDTV image acquisition system with 8M-pixel CMOS image sensor," *Proc. SPIE*, vol. 6068, pp. 606 808–606 808–8, 2006.
- [72] S.-H. Jo, M. Bae, and J.-K. Shin, "Wide dynamic range cmos active pixel sensor using a stacked-photodiode structure," *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, pp. 1378–1381, May 2012.
- [73] Y. Audet and S. S. Aboutorabi, "A cmos process compatible color sensor using wavelength dependent absorption depth," *Circuits and Systems and TAISA Conference, 2008. NEWCAS-TAISA 2008. 2008 Joint 6th International IEEE Northeast Workshop on*, pp. 327–330, 2008.
- [74] R. B. Merrill, "Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure," 1999, US Patent 5,965,875.
- [75] T. Sakai, H. Seo, S. Aihara, H. Ohtake, M. Kubota, and M. Furuta, "Color image sensor using stacked organic photoconductive films with transparent readout circuits separated by thin interlayer insulator," *Proc. SPIE*, vol. 9022, pp. 90 220J–90 220J–7, 2014.
- [76] D. Tamburrino, J. M. Speigle, D. J. Tweet, and J.-J. Lee, "2PFCTM (two pixels, full color): Image sensor demosaicing and characterization," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 19, no. 2, pp. 021 103–021 103–13, 2010.
- [77] R. Lukac, *Single-Sensor Imaging: Methods and Applications for Digital Cameras*, ser. Image Processing Series. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2012.
- [78] R. Lembcke, "Automatische Bestimmung von Farbkorrekturwerten für eine digitale RGB-Kamera," Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
- [79] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, ser. Texts in Computer Science. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2010.
- [80] F. Li, H. Eliasson, and A. Dokoutchaev, "Comparison of objective metrics for image sensor crosstalk characterization," *Proc. SPIE*, vol. 7876, pp. 78 760L–78 760L–12, 2011.
- [81] J. Dudas, C. Jung, G. H. Chapman, Z. Koren, and I. Koren, "Robust detection of defects in imaging arrays," *Proc. SPIE*, vol. 6059, pp. 60 590X–60 590X–12, 2006.
- [82] H. Backe-Hansen, "Defective Pixel Correction," Master of Science in Electronics Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2010.

- [83] C. Mornet, D. Baxter, J. Vaillant, T. Decroux, D. Herault, and I. Schanen, "Toward a quantitative visual noise evaluation of sensors and image processing pipes," *Proc. SPIE*, vol. 7876, pp. 78760Q–78760Q–12, 2011.
- [84] L. Zhang, W. Dong, D. Zhang, and G. Shi, "Two-stage image denoising by principal component analysis with local pixel grouping," *Pattern Recognition*, vol. 43, no. 4, pp. 1531 – 1549, 2010.
- [85] W. Pratt, *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*. Hoboken: Wiley, 2007.
- [86] T. Bose, *Digital signal and image processing*. Hoboken: Wiley, 2004.
- [87] J. Watkinson, *The Art of Digital Video*, 4th ed., ser. Electronics & Electrical. Oxford: Elsevier/Focal Press, 2008.
- [88] T. Hanning, *High Precision Camera Calibration*, ser. Vieweg + Teubner Research. Stuttgart: Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2011.
- [89] H. Malvar, L.-W. He, and R. Cutler, "High-quality linear interpolation for demosaicing of Bayer-patterned color images," *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings. (ICASSP '04). IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. iii–485–8 vol.3, May 2004.
- [90] N. Dargahi and V. Deshpande, "New Methods in Bayer Demosaicking Algorithms," The Stanford Center for Image Systems Engineering, Stanford University, Project Report Course: Psychology 221 Applied Vision & Image Systems Engineering, March 2007. [Online]. Available: <http://scien.stanford.edu/pages/labsite/2007/psych221/projects/07/Dargahi&Deshpande.pdf>
- [91] O. Kapah and H. Z. Hel-Or, "Demosaicking using artificial neural networks," *Proc. SPIE*, vol. 3962, pp. 112–120, 2000.
- [92] J. Herwig and J. Pauli, "Joint high dynamic range imaging and color demosaicing," *Proc. SPIE*, vol. 8180, pp. 81801E–81801E–11, 2011.
- [93] Z. Ge, S. Yao, and J. Xu, "Field-programmable gate array-based hardware architecture for image processing with complementary metal-oxide-semiconductor image sensor," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 19, no. 3, pp. 033014–033014–11, 2010.
- [94] P. Musa, S. A. Sudiro, E. P. Wibowo, S. Harmanto, and M. Paindavoine, "Design and implementation of non-linear image processing functions for cmos image sensor," *Proc. SPIE*, vol. 8558, pp. 85580O–85580O–9, 2012.
- [95] D. G. Bailey, *Design for Embedded Image Processing on FPGAs*. Singapore: Wiley, 2011.
- [96] B. Draper, J. Beveridge, A. P. W. Bohm, C. Ross, and M. Chawathe, "Accelerated image processing on FPGAs," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 12, pp. 1543–1551, Dec 2003.

- [97] I. Kuon and J. Rose, *Quantifying and Exploring the Gap Between FPGAs and ASICs*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2009.
- [98] Y.-L. S. Lin, C.-Y. Kao, H.-C. Kuo, and J.-W. Chen, *VLSI Design for Video Coding: H.264/AVC Encoding from Standard Specification to Chip*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [99] O. Yadid-Pecht, "Wide-dynamic-range sensors," *Optical Engineering*, vol. 38, no. 10, pp. 1650–1660, 1999.
- [100] J. Froehlich, S. Grandinetti, B. Eberhardt, S. Walter, A. Schilling, and H. Brendel, "Creating cinematic wide gamut hdr-video for the evaluation of tone mapping operators and hdr-displays," *Proc. SPIE*, vol. 9023, pp. 90 230X–90 230X–10, 2014.
- [101] T. Georgiev and A. Lumsdaine, "Rich image capture with plenoptic cameras," *Computational Photography (ICCP), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 1–8, March 2010.
- [102] J. Keinert, M. Wetzler, M. Schöberl, P. Schäfer, F. Zilly, M. Bätz, S. Föbel, and A. Kaup, "Cost-effective multi-camera array for high quality video with very high dynamic range," *Proc. SPIE*, vol. 9023, pp. 90 230Y–90 230Y–15, 2014.
- [103] T. G. Georgiev, A. Lumsdaine, and S. Goma, "High dynamic range image capture with plenoptic 2.0 camera," *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest*, p. SWA7P, 2009.
- [104] R. Ng and P. Hanrahan, "Digital correction of lens aberrations in light field photography," *Proc. SPIE*, vol. 6342, pp. 63 421E–63 421E–14, 2007.
- [105] S. Föbel, W. Hüller, P. Schäfer, and F. Zilly, "Postproduktion für Kameraarrays ," in *Forum Medientechnik - Next Generation, New Ideas: Beiträge der Tagung 2013 an der Fachhochschule St. Pölten*, M. Seidl, G. Schmiedl, and T. Kastel, Eds. Verlag VHW, January 2014.
- [106] S. Sugawa, N. Akahane, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, "A 100 db dynamic range cmos image sensor using a lateral overflow integration capacitor," *Solid-State Circuits Conference, 2005. Digest of Technical Papers. ISSCC. 2005 IEEE International*, pp. 352–603 Vol. 1, Feb 2005.
- [107] N. Akahane, R. Ryuzaki, S. Adachi, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, "A 200dB Dynamic Range Iris-less CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Capacitor using Hybrid Voltage and Current Readout Operation," *Solid-State Circuits Conference, 2006. ISSCC 2006. Digest of Technical Papers. IEEE International*, pp. 1161–1170, Feb 2006.
- [108] U. Schmidt, *Professionelle Videotechnik*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2009.

- [109] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, and H. Schmidt, *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
- [110] N. Ricquier and B. Dierickx, "Pixel structure with logarithmic response for intelligent and flexible imager architectures," *Solid State Device Research Conference, 1992. ESS-DERC '92. 22nd European*, pp. 631–634, Sept 1992.
- [111] D. Bancroft, "Use of Logarithmic Non-Linear Transfer Characteristic for Transmission of Linear Signals through Limited-Bit-Depth Image Representations and Interfaces," SMPTE Registered Disclosure Document RDD 2-2007, 2007.
- [112] B. Fowler, "High dynamic range image sensor architectures," *Proc. SPIE*, vol. 7876, pp. 787 602–787 602–15, 2011.
- [113] J. Keinert, M. Schöberl, and M. Ziegler, "High Dynamic Range Video Cameras based on Single Shot non-regular Sampling," in *The Best of IET and IBC 2013*, ser. IET Journals, no. 5, September 2013.
- [114] M. Schöberl, A. Belz, A. Nowak, J. Seiler, A. Kaup, and S. Föbel, "Building a high dynamic range video sensor with spatially nonregular optical filtering," *Proc. SPIE*, vol. 8499, 2012.
- [115] M. Schöberl, J. Keinert, M. Ziegler, J. Seiler, M. Niehaus, G. Schuller, A. Kaup, and S. Föbel, "Evaluation of a high dynamic range video camera with non-regular sensor," *Proc. SPIE*, vol. 8660, pp. 86 600M–86 600M–12, 2013.
- [116] B. M. Deegan, "The effect of split pixel hdr image sensor technology on mtf measurements," *Proc. SPIE*, vol. 9023, pp. 90 230Z–90 230Z–9, 2014.
- [117] L. Binqiao, S. Zhongyan, and X. Jiangtao, "Wide dynamic range cmos image sensor with in-pixel double-exposure and synthesis," *Journal of Semiconductors*, vol. 31, no. 5, p. 055002, 2010.
- [118] M. Schöberl, A. Oberdörster, S. Föbel, H. Bloss, and A. Kaup, "Digital neutral density filter for moving picture cameras," *Proc. SPIE*, vol. 7533, pp. 75 330L–75 330L–10, 2010.
- [119] J. H. Park, M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, Y. Wakamori, and Y. Ohta, "An ultra wide dynamic range cmos image sensor with a linear response," *Proc. SPIE*, vol. 6068, pp. 60 680B–60 680B–8, 2006.
- [120] C. Coates, B. Fowler, and G. Holst, "scmos - scientific cmos technology. a high-performance imaging breakthrough," Andor Technology, Fairchild Imaging and PCO AG, Whitepaper, 2009.
- [121] M. Ciselinski, "Bildsensor," 2010, Offenlegungsschrift DE 10 2010 051 968 A1.
- [122] J.-t. Xu, Z.-x. Yang, S.-b. Zhao, and S.-y. Yao, "A global shutter CMOS image sensor with wide dynamic range pixel," *Proc. SPIE*, vol. 7384, pp. 73 842S–73 842S–6, 2009.

- [123] Y. Chen, Y. Xu, Y. Chae, A. Mierop, X. Wang, and A. Theuwissen, "A 0.7e rms-temporal-readout-noise cmos image sensor for low-light-level imaging," *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International*, pp. 384–386, Feb 2012.
- [124] K. Hirakawa and P. Simon, "Single-shot high dynamic range imaging with conventional camera hardware," *Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1339–1346, Nov 2011.
- [125] J. Tumblin, A. Agrawal, and R. Raskar, "Why i want a gradient camera," *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, vol. 1, pp. 103–110 vol. 1, June 2005.
- [126] "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures," Recommendation ITU-R BT.500-13, 2012.
- [127] "Subjective Assessment Methods for Image Quality in High-Definition Television," Recommendation ITU-R BT.710-4, 1998.
- [128] K. P. Bönisch, "Subjektive Bildqualitätsbeurteilung im digitalen Kino," Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2009.
- [129] H.-P. Wu, P. Li, Y. Wang, Y.-W. He, and C. Li, "Measurement for opto-electronic conversion functions (oecfs) of digital still-picture camera," *Proc. SPIE*, vol. 7850, pp. 78 501D–78 501D–7, 2010.
- [130] Tektronix, *A Guide to Standard and High-Definition Digital Video Measurements*, 2009.
- [131] "Photography - Electronic still-picture cameras - Determination of ISO speed," Norm ISO 12232, 1998.
- [132] "Photography - Electronic still-picture cameras - Resolution measurements," Norm ISO 12233, 2000.
- [133] "Photography - Electronic still-picture cameras - Methods for measuring opto-electric conversion functions (OECFs)," Norm ISO 14524, 1999.
- [134] "Measurement of imaging performance of TV cameras for the purpose of characterisation and setting," Tech Report EBU - TECH 3335, 2012.
- [135] European Machine Vision Association, "Standard 1288. standard for characterization of image sensors and cameras." *Standard for Characterization of image Sensors and Cameras. Release 3.0*, 2010.
- [136] A. Darmont, J. Chahiba, J. F. Lemaitre, M. Pirson, and D. Dethier, "Implementing and using the emva1288 standard," *Proc. SPIE*, vol. 8298, pp. 82 980H–82 980H–7, 2012.

- [137] Grass Valley USA, LLC, "LDK 8000 Elite Series," 2013, Product Data Sheet.
- [138] Sony Corporation, "PDW-680 Professional Disc Camcorder," 2012, Product Brochure.
- [139] G. Humpston, A. Grinman, O. Jackl, and M. Ebel, "Optical performance of bare image sensor die and sensors packaged at the wafer level and protected by a cover glass," *Proc. SPIE*, vol. 6897, pp. 68 970U–68 970U–11, 2008.
- [140] C. Loebich, D. Wueller, B. Klingen, and A. Jaeger, "Digital camera resolution measurement using sinusoidal siemens stars," *Proc. SPIE*, vol. 6502, pp. 65 020N–65 020N–11, 2007.
- [141] P. D. Burns and D. Williams, "Sampling efficiency in digital camera performance standards," *Proc. SPIE*, vol. 6808, pp. 680 805–680 805–5, 2008.
- [142] S. C. Kelly and B. W. Keelan, "ISO 12232 revision: determination of chrominance noise weights for noise-based ISO calculation," *Proc. SPIE*, vol. 5668, pp. 139–147, 2005.
- [143] Q. Fu, Z. Zhou, Y. Yuan, and B. Xiangli, "Image quality evaluation of light field photography," *Proc. SPIE*, vol. 7867, pp. 78 670F–78 670F–9, 2011.
- [144] RED.COM, INC., "RED EPIC. OPERATION GUIDE," 2011.
- [145] Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG, "Camera Datasheet ALEXA," 2011, Ident.-No.: K5.40948.A.
- [146] Blackmagic Design, "Installation and Operation Manual. Blackmagic Cameras," 2013.
- [147] P. W. Wong and Y. H. Lu, "A method for the evaluation of wide dynamic range cameras," *Proc. SPIE*, vol. 8299, pp. 829 905–829 905–12, 2012.
- [148] B. Fowler and X. C. Liu, "Analysis and simulation of low light level image sensors," *Proc. SPIE*, vol. 6201, pp. 620 124–620 124–11, 2006.
- [149] F. Toadere, "Simulating the functionality of a digital camera pipeline," *Optical Engineering*, vol. 52, no. 10, pp. 102 005–102 005, 2013.
- [150] S. Vitek, "Measurement and analysis of image sensors," *Proc. SPIE*, vol. 5944, pp. 59 440J–59 440J–7, 2005.
- [151] I. Djité, P. Magnan, M. Etribeau, G. Rolland, S. Petit, and O. Saint-pé, "Modeling and measurements of mtf and quantum efficiency in ccd and cmos image sensors," *Proc. SPIE*, vol. 7536, pp. 75 360H–75 360H–12, 2010.
- [152] A. Darmont, "Using the emva1288 standard to select an image sensor or camera," *Proc. SPIE*, vol. 7536, pp. 753 609–753 609–9, 2010.
- [153] BAE Systems Imaging Solutions, "CIS1021 Datasheet. 2.1 MP HD CMOS Image Sensor," Datasheet, 2011, Rev. A.

- [154] G. A. Weissler, *Einführung in die industrielle Bildverarbeitung*. Haar b. München: Franzis, 2007.
- [155] E. Carey and V. Rowley, "GigE Vision. Video Streaming and Device Control Over Ethernet Standard," Automated Imaging Association, Ann Arbor, Michigan, Standard Specification version 2.0, March 2013. [Online]. Available: http://www.visiononline.org/form.cfm?form_id=701
- [156] "Motion-Picture Cameras - 16-mm and 8-mm Threaded Lens Mounts (R2001)," Standard SMPTE 76-1996 (Stabilized 2012), 1996.
- [157] J. C. Dunlap, W. C. Porter, E. Bodegom, and R. Widenhorn, "Dark current in an active pixel complementary metal-oxide-semiconductor sensor," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 20, no. 1, pp. 013 005–013 005–8, 2011.
- [158] T.-C. Kim, "Wide dynamic range technologies: For mobile imaging sensor systems." *Consumer Electronics Magazine, IEEE*, vol. 3, no. 2, pp. 30–35, April 2014.
- [159] M. G. Prais, "Improving the sensitometric and oecf standards: recognizing the photo-sensitive exposure range," *Proc. SPIE*, vol. 7876, pp. 78 760T–78 760T–11, 2011.
- [160] F. Kohlrausch, *Praktische Physik. Zum Gebrauch für Unterricht Forschung und Technik*, 24th ed. Stuttgart: B.G. Teubner, 1996, vol. Band 2.
- [161] Y. Gu, N. Narendran, T. Dong, and H. Wu, "Spectral and luminous efficacy change of high-power LEDs under different dimming methods," *Proc. SPIE*, vol. 6337, pp. 63 370J–63 370J–7, 2006.
- [162] J. Schanda, K. Muray, and B. Kranicz, "Led colorimetry," *Proc. SPIE*, vol. 4421, pp. 781–784, 2002.
- [163] H. Naumann, G. Schröder, and M. Löffler-Mang, *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. München: Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [164] G. Litfin, *Technische Optik in Der Praxis*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005.
- [165] E. Schäfer, *Technische Optik: mathematische und physikalische Grundlagen ; mit 39 Beispielen und 4 Tabellen*, ser. Studium Technik. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1997.
- [166] G. Schröder and H. Treiber, *Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen*, ser. Kamprath-Reihe. Würzburg: Vogel, 2002.
- [167] Tektronix, "Camera Measurements," Application Note, 2009.
- [168] D. Wueller, "Benefits and limitations using multifeature test charts," *Proc. SPIE*, vol. 7537, pp. 75 370T–75 370T–12, 2010.

- [169] Image Engineering GmbH & Co. KG, "Esser testcharts. te269d datasheet. oecf measurement." [Online]. Available: http://www.image-engineering.de/datasheets_manuals/testcharts/TE269_1000000_1_D_datasheet.pdf
- [170] H. Sugiura, T. Kuno, and H. Ikeda, "Methods of measurement for color reproduction of digital cameras," *Proc. SPIE*, vol. 3302, pp. 113–122, 1998.
- [171] D. Kim, J. Oh, K. Sohn, and H. Shin, "Automatic radial distortion correction in zoom lens video camera," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 19, no. 4, pp. 043 010–043 010–7, 2010.
- [172] D. M. Chandler, "Seven Challenges in Image Quality Assessment: Past, Present, and Future Research," *ISRN Signal Processing*, vol. 2013, p. 53, 2013.
- [173] T. D. Phan, S. K. Shah, D. M. Chandler, and S. Sohoni, "Microarchitectural analysis of image quality assessment algorithms," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 23, no. 1, p. 013030, 2014.
- [174] M. Mrak, M. Grgic, and M. Kunt, *High-Quality Visual Experience: Creation, Processing and Interactivity of High-Resolution and High-Dimensional Video Signals*, ser. Signals and Communication Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [175] F. Cao, F. Guichard, and H. Hornung, "Information capacity: a measure of potential image quality of a digital camera," *Proc. SPIE*, vol. 7537, pp. 75 370F–75 370F–10, 2010.
- [176] B. W. Keelan, *Handbook of Image Quality. Characterization and Prediction*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.

7 Abbildungsverzeichnis

1	HDTV-Kompatible Übertragung von HDR-Bewegt看	8
2	Prinzipschaltbild eines analogen CMOS APS	11
3	Prinzipschaltbild eines CMOS APS mit ADC	11
4	Prinzipschaltbild eines aktiven 3T - Pixels	12
5	Verlauf der Kathodenspannung an der Photodiode eines überstrahlten APS- Bildsensors	12
6	UI-Kennlinie einer PN-Photodiode	14
7	Aufbau einer PN-Photodiode und einer Pinned Photodiode	14
8	DSP-Pipeline	23
9	Prinzipschaltbild sCMOS-Readout	39
10	Typische OECF eines CMOS Bildsensors	41
11	Referenzaufbau	43
12	Messaufbau auf mit Graukeil auf Microbank	47
13	OECF HiDyV, Aufbau auf optischer Bank	53

Inhalt der beiliegenden CD-ROM

Bachelorthesis

Bachelorthesis_Johannes_Zink.pdf

Diese Arbeit als pdf-Dokument mit verlinkten Querverweisen

Bachelorthesis_Johannes_Zink_printfassung.pdf

Diese Arbeit als pdf-Dokument als druckbare Fassung mit Leerseiten für doppelseitigen Druck

Bilder

Demonstration

readme.txt

Technische Referenzdaten zur Aufnahme

Reference_Scene.tif

Aufnahmen mit dem zu vermessenden Kamerasystem zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Systems als tiff-Dateien mit 48bpp (16bit pro Farbauszug und Pixel), linearer Kennlinie ohne Nachbearbeitung außer GO-Korrektur und Debayering

Versuchsaufbauten

Referenzaufbau-eingehaust.jpg

Referenzaufbau-geöffnete_Verkleidung.jpg

Referenzaufbau-Aufnahme_entlang_der_optischen_Achse.jpg

Aufbau_optische_Bank-eingehaust.jpg

Aufbau_optische_Bank-ohne_Verkleidung.jpg

Aufbau_optische_Bank-ohne_Verkleidung-Seitenansicht.jpg

Aufbau_optische_Bank-Strahlteilergehäuse_geöffnet.jpg

Aufbau_optische_Bank-Detailaufnahme_Strahlteilergehäuse_abgenommener_Deckel.jpg

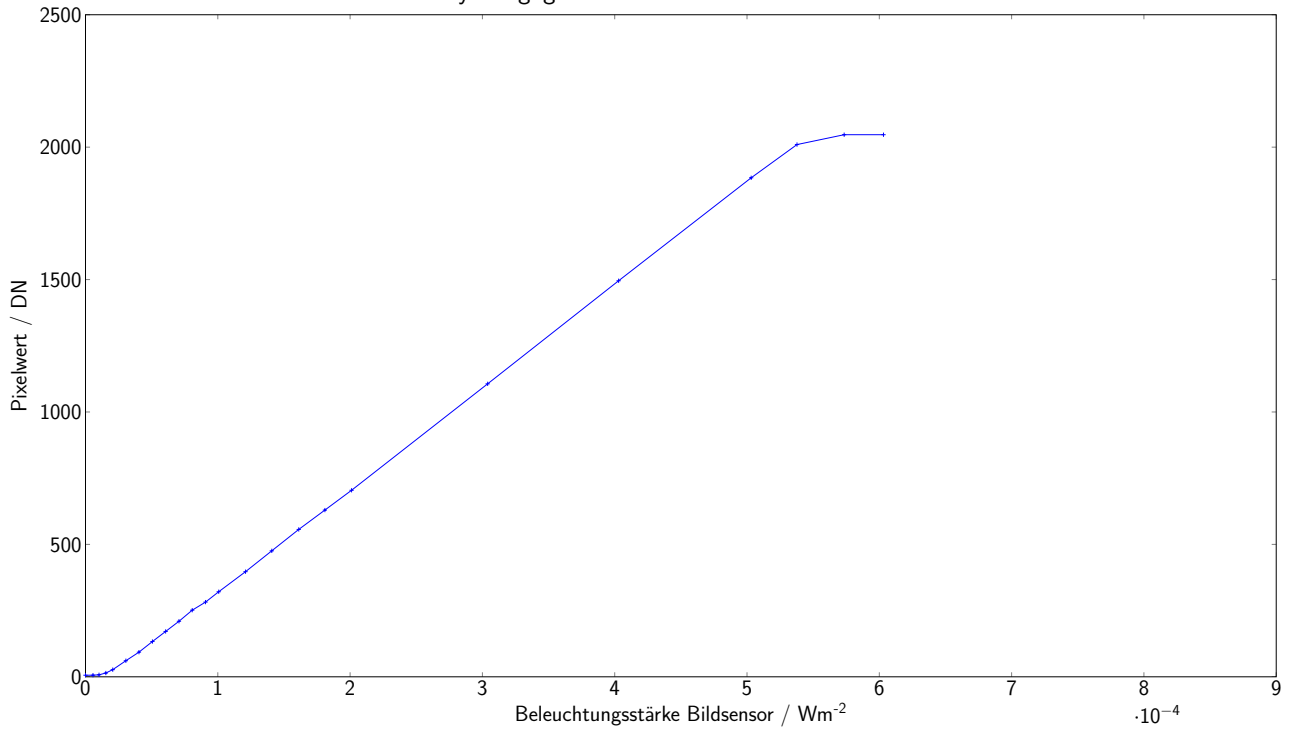
Bilder des Referenzaufbaus und Bilder des Aufbaus auf der optischen Bank als jpg-Dateien

Appendices

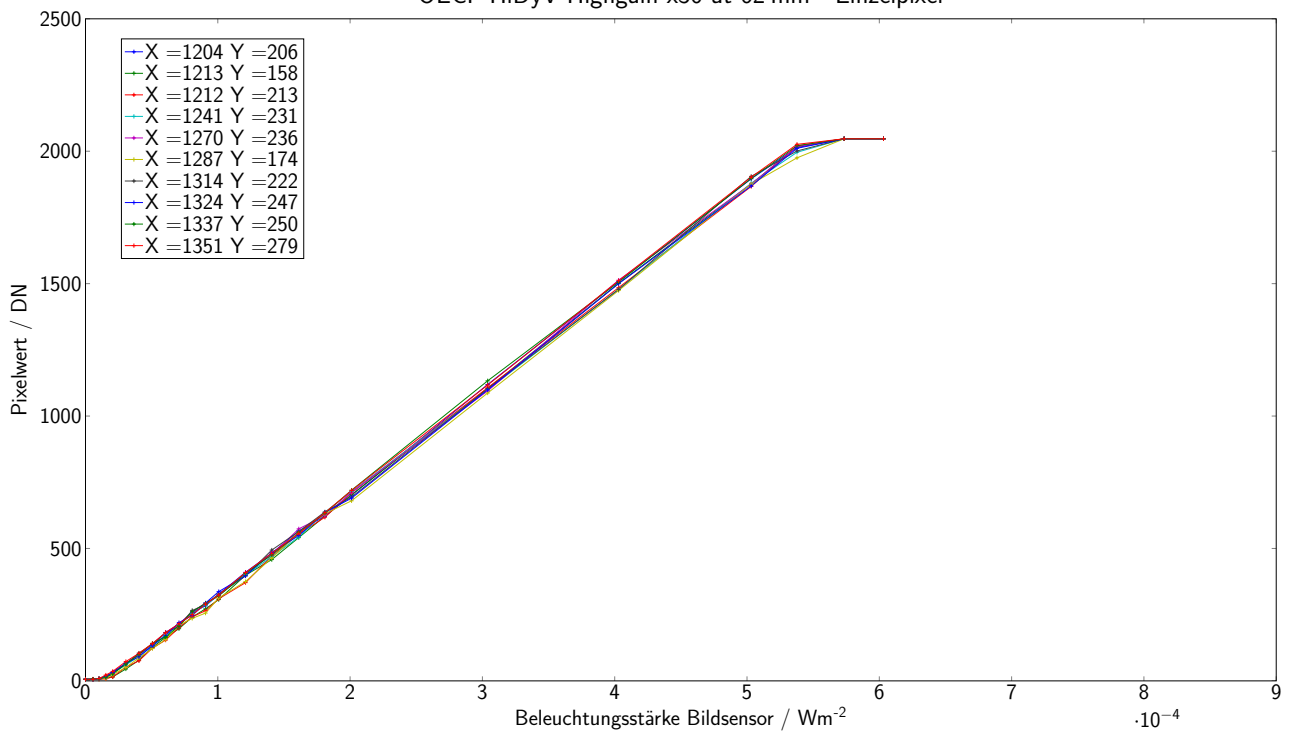
Appendix A - Plots der Versuchsauswertungen

Referenzaufbau

OEFC HiDyV Highgain x30 at 624nm - Mittelwert über 10 Pixel

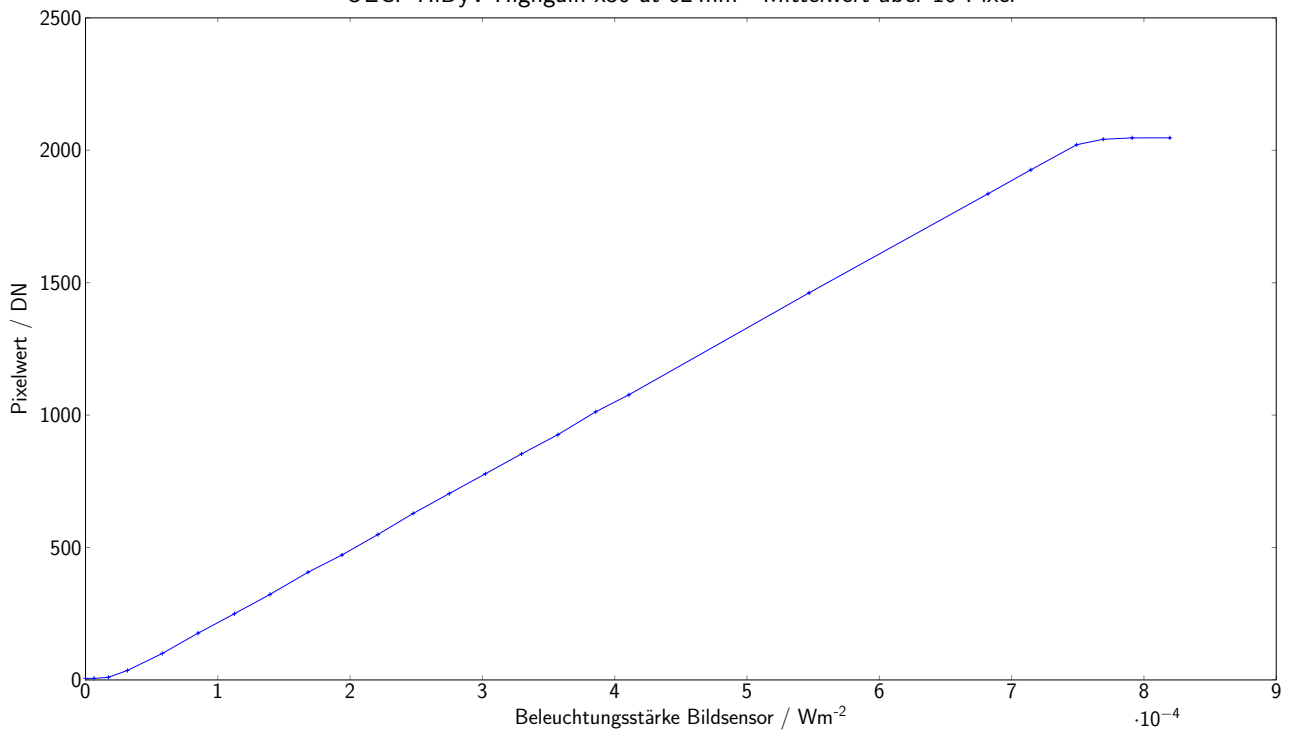


OEFC HiDyV Highgain x30 at 624nm - Einzelpixel

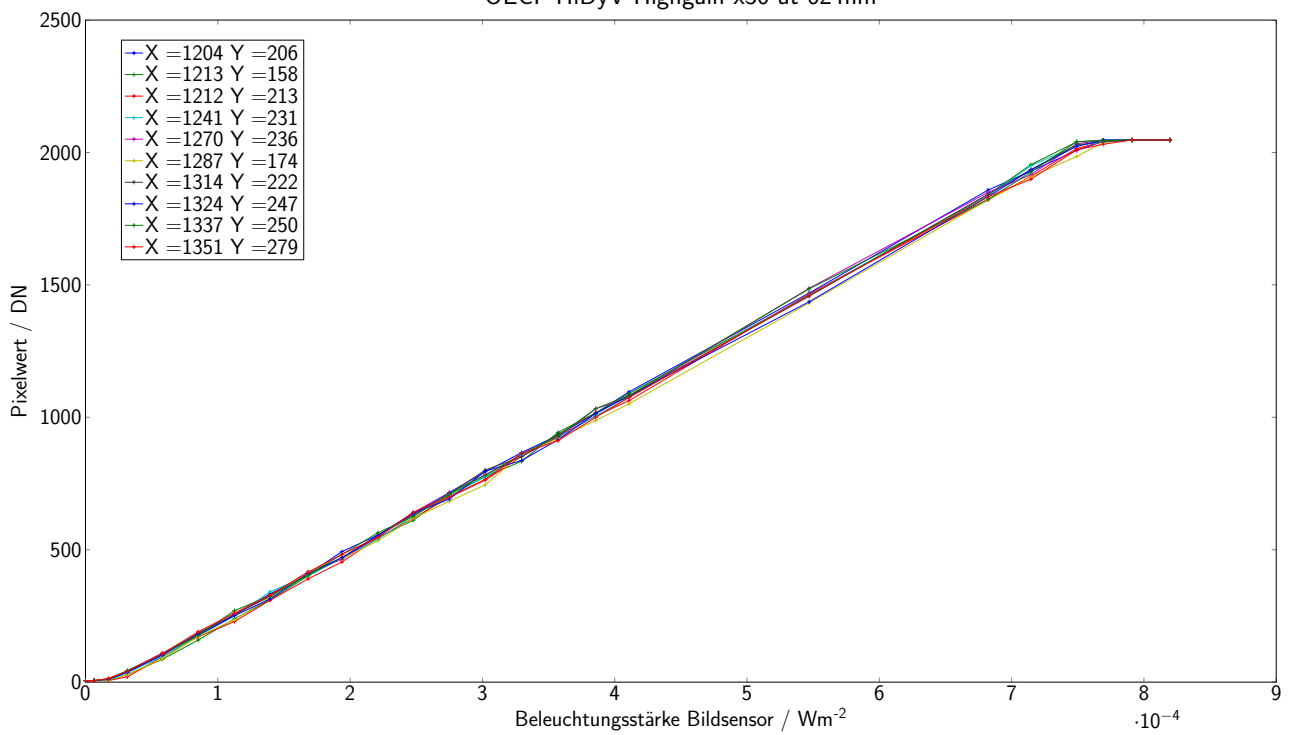


Aufbau auf Optischer Bank

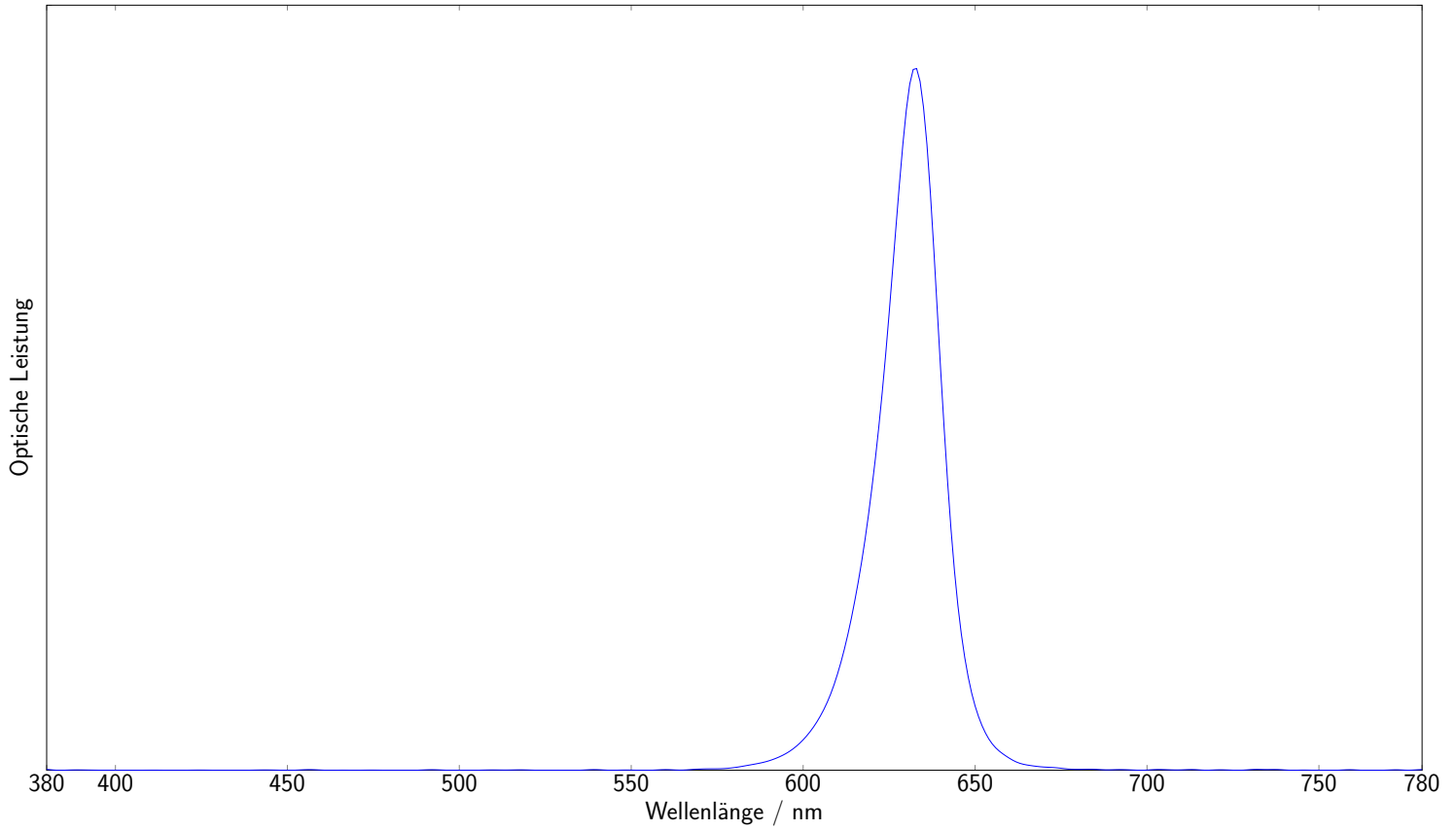
OEFC HiDyV Highgain x30 at 624nm - Mittelwert über 10 Pixel



OEFC HiDyV Highgain x30 at 624nm



Appendix B - Spektrum der verwendeten Power-LED



gemessen mit JETI Specbos-1100, S/N 319438