

# Verfahren zur Auflösungs- messung digitaler Kameras

Diplomarbeit

im Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik  
an der Fachhochschule Köln

Autor

Anke Neumann

aus Wuppertal

Mat.-Nr. 11020434

Referent: Prof. Dr. Jörg Gutjahr

1. Korreferent: Dipl.-Ing. Dietmar Wüller, Image Engineering Dietmar Wüller,  
Frechen-Königsdorf

2. Korreferent: Prof. Dr. Bruno Kligen

Köln, im Juni 2003

# Methods to Measure Resolution of Digital Cameras

Thesis  
at the Department of  
Imaging Sciences and Media Technology  
University of Applied Sciences Cologne

Author  
Anke Neumann  
Wuppertal  
Mat.-Number. 11020434

First Reviewer: Prof. Dr. Jörg Gutjahr  
Second Reviewer: Dipl.-Ing. Dietmar Wüller, Image Engineering Dietmar Wüller,  
Frechen-Königsdorf  
Third Reviewer: Prof. Dr. Bruno Kligen

Cologne, June 2003

# Kurzbeschreibung

**Titel:** Verfahren zur Auflösungs- messung digitaler Kameras

**Autor:** Anke Neumann

**Referenten:** Prof. Dr. Jörg Gutjahr/ Dipl.-Ing. Dietmar Wüller/  
Prof. Dr. Bruno Kligen

**Zusammenfassung:** Die Arbeit stellt verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) digitaler Kameras vor. Dabei kommen Fouriertransformation, Phasenshiftverfahren, Histogrammanalyse und Fit-Verfahren als Auswertungsmethoden zum Einsatz. Abschließend wird ein Vergleich aller Verfahren durchgeführt. Ein Software-Tool ermöglicht eine automatische Auswertung.

**Stichwörter:** Digitalkamera, MTF, Siemensstern, Auflösung

**Sperrvermerk:** Die vorgelegte Arbeit ist bis zum 13.06.2005 gesperrt.

**Datum:** 13.06.2003

## Abstract

**Title:** Methods to Measure Resolution of Digital Cameras

**Author:** Anke Neumann

**Reviewer:** Prof. Dr. Jörg Gutjahr/ Dipl.-Ing. Dietmar Wüller/  
Prof. Dr. Bruno Kligen

**Summary:** The thesis presents different methods to define the modulation transfer function (MTF) of digital cameras. The proposed methods are fourier transformation, phase shift algorithm, histogram analysis and fit-method. Finally all methods are compared with each other. A software tool allows an automatic analysis.

**Keywords:** Digital Camera, MTF, Siemensstar, Resolution

**Lock flag:** This Thesis is closed until the 13.06.2005

**Date:** 13.06.2003

# Danksagung

Mein Dank gilt zunächst meinem Referenten Herrn Prof. Dr. Jörg Gutjahr und meinen Korreferenten Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Wüller und Herrn Prof. Dr. Bruno Klingen, die mich über die gesamte Zeit meiner Arbeit ausgezeichnet betreut haben. Ferner danke ich Herrn Dipl.-Ing. Anton Kraus für die tatkräftige Hilfe und umfangreichen Erklärungen, der Firma Leica Camera AG für die finanzielle Unterstützung und dort im Besonderen Herrn Dipl.-Phys. Bernd Harand. Außerdem möchte ich mich bei Monika Hiller dafür bedanken, dass sie mich jeden Tag ohne Murren ertragen hat und für die freundliche Zurverfügungstellung ihres Optiksripts, Pamela Lubitz für ihre Vorlesungsmitschrift und fürs Korrekturlesen sowie Herrn Dipl.-Ing. Johannes Lesaar für die Unterstützung beim Druck dieser Arbeit. Ferner danke ich allen, die in jeglicher Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und hier nicht namentlich erwähnt sind. Abschließend gebührt mein Dank natürlich meinen Eltern und meinem Freund Sven Jäger, die mich über mein gesamtes Studium immer unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Lineare Systeme . . . . .	3
2.1.1	Übertragungsfunktion . . . . .	4
2.1.2	Impulsantwortfunktion . . . . .	6
2.2	Abtastung . . . . .	7
2.2.1	CCD-Kamera . . . . .	7
2.2.2	Abtasttheorem . . . . .	9
2.3	Verfahren zur Kontrastberechnung . . . . .	10
2.3.1	Fouriertransformation . . . . .	10
2.3.2	Phasenshiftverfahren . . . . .	12
2.3.3	Histogramm . . . . .	13
2.3.4	Fit-Verfahren . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Testaufbau</b>	<b>16</b>
3.1	Testchart . . . . .	16
3.2	Testbedingungen . . . . .	18
3.3	Linearisierung von Vorlage und Kamera . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Durchführung der Auswertung</b>	<b>22</b>
4.1	Matlab 6.5 . . . . .	22

---

4.2	Auswertungsprogramm . . . . .	24
4.2.1	Datenerfassung . . . . .	24
4.2.2	Schwerpunktverfahren . . . . .	26
4.2.3	Linearisierung und Auswahl der Siemenssterne . . . . .	30
4.2.4	Auflösungsberechnung . . . . .	31
4.2.5	Ausgabe der Ergebnisse . . . . .	32
4.3	Auswertungsverfahren . . . . .	34
4.3.1	Kontrastberechnung mit Hilfe der Fouriertransformation . . . . .	34
4.3.2	Kontrastberechnung mit Hilfe des Phasenshiftverfahrens . . . . .	36
4.3.3	Kontrastberechnung mit Hilfe des Histogramms . . . . .	41
4.3.4	Kontrastberechnung mit Hilfe des Fit-Verfahrens . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Ergebnisanalyse</b>	<b>46</b>
5.1	Vergleich der Testverfahren . . . . .	46
5.1.1	Binärer und harmonischer Siemensstern . . . . .	49
5.1.2	Vergleich der Auswertungsmethoden . . . . .	51
5.1.3	Vergleich mit SFR-Verfahren . . . . .	59
5.2	Schlussfolgerungen und Möglichkeiten . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>66</b>
<b>B</b>	<b>Inhalt der CD</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>Erklärungen</b>	<b>69</b>
C.1	Eidesstattliche Erklärung . . . . .	69
C.2	Sperrvermerk . . . . .	69
C.3	Weitergabeerklärung . . . . .	70

# 1 Einleitung

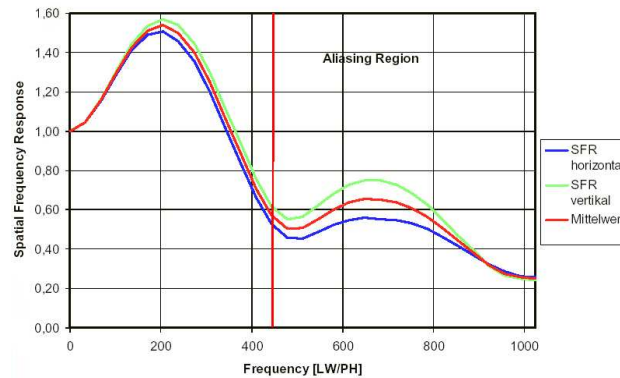
Ein Verfahren zur Messung der Auflösung von elektronischen Standbildkameras wird bereits im ISO-Standard 12233 beschrieben. Warum behandelt diese Diplomarbeit demnach ein Thema, dessen Lösung bereits existiert und sogar standardisiert ist?

Das bisherige Verfahren nutzt die Tatsache, dass aus der Abbildung eines Schwarz-Weiß-Übergangs beziehungsweise einer Kante die Linienbildfunktion als Ableitung der Kantenbildfunktion berechnet werden kann. Daraus lässt sich wiederum mit Hilfe der Fouriertransformation die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) bestimmen. [OPT] Dies ist in der Regel ein zuverlässiges und genaues Verfahren, das zum Beispiel auch zur MTF-Messung von Objektiven eingesetzt wird.

Bei digitalen Kameras handelt es sich jedoch nicht um ein reines optisches System. Vor allem durch den Einsatz von Bildverarbeitungsalgorithmen innerhalb der Kamera werden die Übertragungseigenschaften des Systems künstlich beeinflusst. So werden zum Beispiel im Consumerbereich Bilder oft vor der endgültigen Ausgabe geschärft oder komprimiert, wodurch Artefakte entstehen können. Nicht selten hat der Nutzer kaum oder keinen Einfluss auf die Bildverarbeitung, die bereits in der Kamera vorgenommen wird. Der Zugriff auf die reinen Rohdaten ist dadurch oft unmöglich.

Genau hier liegt das Problem des bisherigen Verfahrens. Liegen die Rohdaten aus der Kamera vor, funktioniert das Verfahren und liefert schlüssige Ergebnisse, aus denen die Auflösungsgrenze des Systems bestimmt werden kann. Wenn dies jedoch nicht der Fall ist, führt das Verfahren zwar eine korrekte Analyse der Kante durch (s. Abb. 1.1), mit dem Ergebnis kann jedoch nicht die Leistungsfähigkeit der Kamera, feine Details aufzulösen, beschrieben werden. [WUL]

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Verfahren zu finden, das die MTF für alle Kameras



**Abbildung 1.1:** SFR-Messung Olympus Camedia C-1400 XL [WUL]

zuverlässig ermittelt. Dabei wurden folgende Voraussetzungen berücksichtigt:

- Die Auswertung der Messung sollte einen zeitlichen Rahmen von ungefähr einer Stunde nicht überschreiten.
- Es sollte möglichst nur ein Bild gemacht werden, aus dem alle wichtigen Funktionen zur Bestimmung der MTF hervorgehen. Die Aufnahme von weiteren Bildern sollte lediglich der Kontrolle der Messdaten und der Minderung von Fehlern dienen.
- Es sollte ein Testchart erstellt werden, mit dem man an verschiedenen Positionen im Bild den Modulationsverlauf ermitteln kann, um zum Beispiel Unterschiede zwischen Bildmitte und Bildrand festzustellen.

Es wurden verschiedene Verfahren getestet, die diese Voraussetzungen erfüllen. Als Testmuster dienten Siemenssterne. Dabei wurde zunächst mit einem binären Siemensstern gearbeitet, der ein schwarzweißes Rechtecksignal als Vorlage liefert. Später erfolgte die Auflösungsmessung über einen harmonischen Stern mit einem sinusförmigen Grauverlauf.

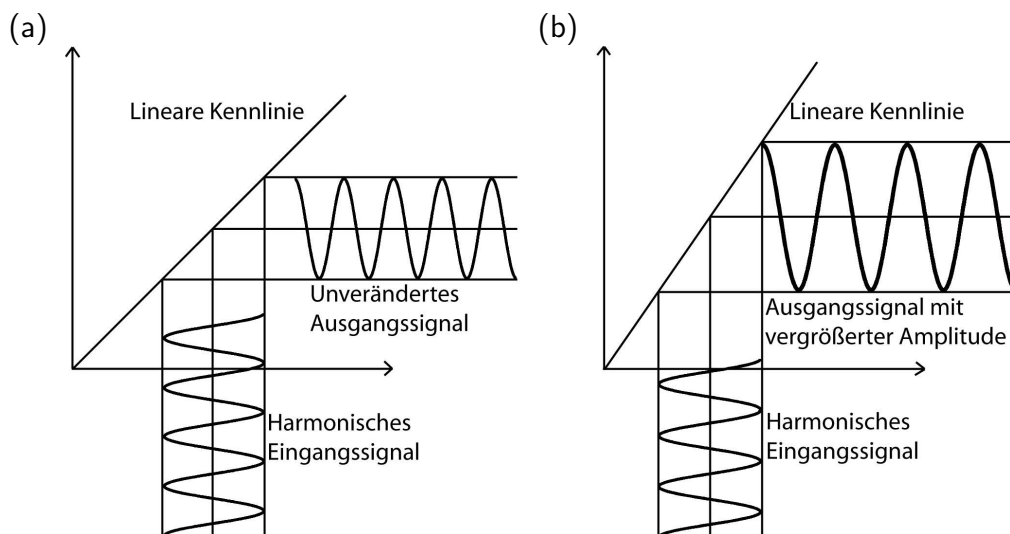
Im Folgenden werden diese Verfahren mit ihrer Auswertung genauer vorgestellt und auf ihre Praxistauglichkeit geprüft. Ferner wird ein Tool vorgestellt, mit dem die Auflösung automatisch ermittelt werden kann.



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Lineare Systeme

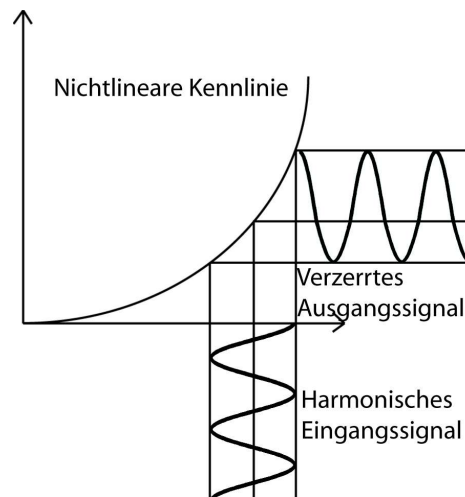
Ziel der Theorie linearer Systeme beziehungsweise Systeme im Allgemeinen ist es, ihr Verhalten beschreiben zu können, „ohne den 'inneren Mechanismus' im Einzelnen kennen oder erläutern zu müssen“ [STO].



**Abbildung 2.1:** Lineares System ohne (a) und mit (b) Amplitudenänderung

Charakteristisch für ein lineares System ist dabei, dass für ein harmonisches Eingangssignal ein harmonisches Ausgangssignal mit gleicher Frequenz erzeugt wird. Es kann sich lediglich die Amplitude verändern oder eine Phasenverschiebung auftreten (s. Abb. 2.1). In den folgenden Erläuterungen zur Übertragungsfunktion und Impulsantwort wird als Voraussetzung ein lineares System angenommen.

Bei dem System „Digitalkamera“ handelt es sich jedoch um ein nichtlineares System. Durch ein solches System wird ein harmonisches Eingangssignal verzerrt, sodass es sich am Ausgang nicht mehr um eine harmonische Schwingung handelt (s. Abb. 2.2). Um dennoch die folgenden Ausführungen auf das System „Digitalkamera“ übertragen



**Abbildung 2.2:** Nichtlineares System [TON]

zu können, ist es sinnvoll, das Kamerabild vor der Weiterverarbeitung zu linearisieren (vgl. Kap. 3.3).

### 2.1.1 Übertragungsfunktion

Die Übertragungsfunktion beschreibt die Eigenschaften eines linearen Systems. Sie besteht aus der Amplituden- beziehungsweise Modulations- und der Phasenübertragungsfunktion. Erstere beschreibt „die Dämpfung, die ein Signal durch ein lineares System erfährt“, letztere „die Phasenverschiebung des Ausgangssignals gegen das Eingangssignal“ [OPT]. Seien ein harmonisches Eingangs- ( $S_E$ ) und Ausgangssignal ( $S_A$ ) gegeben durch

$$S_E = A_0 \cdot \cos(2\pi fx - \varphi)$$

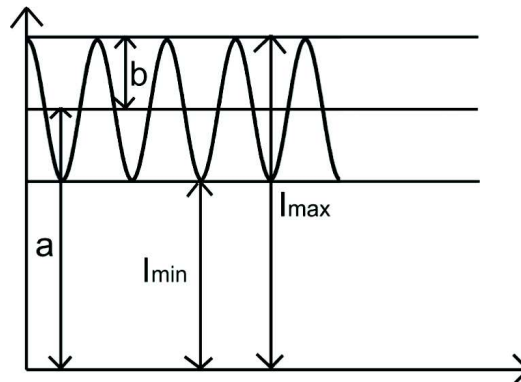
$$S_A = A'_0 \cdot \cos(2\pi fx - \varphi')$$

Dann ergibt sich die Übertragungsfunktion (TF = Transfer Function) als

$$TF(f) = \frac{A'_0}{A_0}(f) \cdot e^{i(\varphi' - \varphi)(f)} \quad (2.1)$$

Die Amplitudenübertragungsfunktion ist dabei definiert als Quotient von Ausgangs- ( $A'_0$ ) und Eingangsamplitude ( $A_0$ ), die Phasenübertragungsfunktion als Differenz der entsprechenden Phasenwerte ( $\varphi' - \varphi$ ). Voraussetzung zur Berechnung der Übertragungsfunktion sind harmonische Signale. [LUB]

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines optischen Systems kann man die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) nutzen. Diese hat den Vorteil, dass sie den Verlauf der vom System übertragenen Modulation in Abhängigkeit von den jeweiligen Ortsfrequenzen darstellt. Eine Aussage über das entsprechende System kann nach Bestim-



**Abbildung 2.3:** Darstellung von  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ,  $a$  und  $b$

mung der Modulation beziehungsweise des Kontrasts für verschiedene Ortsfrequenzen getroffen werden. Sie ist definiert als

$$Modulation = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{a + b - (a - b)}{a + b + (a - b)} = \frac{2b}{2a} = \frac{b}{a} \quad (2.2)$$

Dabei ist  $a$  der Mittelwert und  $b$  die Amplitude eines harmonischen Signals (s. Abb. 2.3) der Form  $f(x) = a + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{g}x\right)$ , wobei  $g$  die Periodenlänge darstellt.

Die MTF ist daher „ein Maß für die Kontrastverringerng im Ausgangsspektrum, verglichen mit dem Eingangsspektrum“ [HEC]. Die normierte MTF ist wie folgt definiert.

$$MTF = \frac{Modulation_{Bild}}{Modulation_{Vorlage}} \quad (2.3)$$

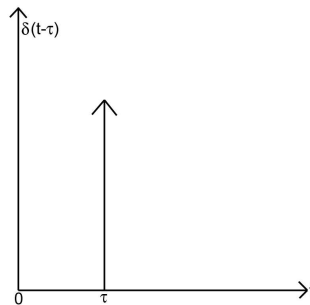
Die Modulationsübertragungsfunktion hat wie die allgemeine Übertragungsfunktion den Vorteil, dass sich die Gesamtübertragungsfunktion durch Multiplikation der Übertragungsfunktionen der Einzelkomponenten berechnen lässt.

$$MTF_{ges} = MTF_1 \cdot MTF_2 \cdot \dots \cdot MTF_n \quad (2.4)$$

„Allerdings trifft dies nicht auf Systeme hintereinander angeordneter Linsen zu: Die Abbildungsfehler einer Linse können in diesem Fall die Abbildungsfehler einer anderen Linse ausgleichen, sodass die Komponenten nicht unabhängig voneinander betrachtet werden dürfen.“ [HEC] In dieser Diplomarbeit sollen jedoch nicht die Einzelkomponenten einer digitalen Kamera, sondern das Gesamtsystem überprüft werden.

### 2.1.2 Impulsantwortfunktion

Die Impulsantwortfunktion  $h(x)$  beschreibt, wie die Übertragungsfunktion, die Eigenschaften eines linearen Systems. Sie ist die Systemantwort auf einen unendlich kurzen

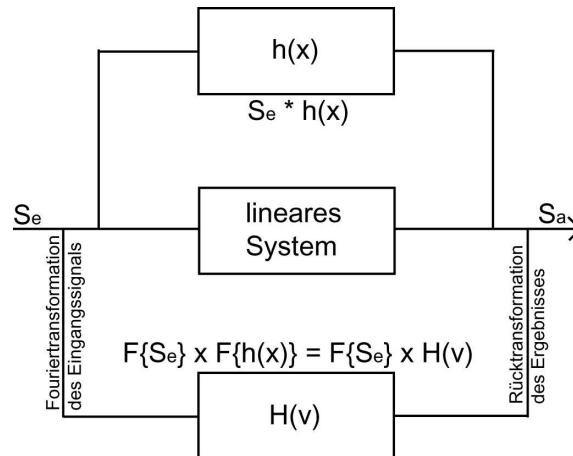


**Abbildung 2.4:** Graphisches Symbol für die  $\delta$ -Funktion [STO]

Eingangsimpuls mit der Fläche Eins. Mathematisch wird dieser mit der  $\delta$ -Funktion dargestellt (s. Abb. 2.4). Das Ausgangssignal ergibt sich dann aus der Faltung des Eingangssignals mit der Impulsantwort, das gleich dem folgenden Faltungsintegral ist:

$$S_A = S_E * h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} S_E(\tau) \cdot h(x - \tau) d\tau \quad (2.5)$$

Da die Impulsantwortfunktion die Fouriertransformierte der Übertragungsfunktion ist (s. Abb. 2.5), erhält man die Fouriertransformierte des Ausgangssignals durch eine ein-



**Abbildung 2.5:** Zusammenhang: Impulsantwort- und Übertragungsfunktion [HIL]

fache Multiplikation der Transformaten des Eingangssignals mit der Transformaten der Impulsantwort beziehungsweise mit der Übertragungsfunktion ( $H(v)$ ).

$$\mathcal{F}\{S_A\} = \mathcal{F}\{S_E\} \cdot \mathcal{F}\{h(x)\} = \mathcal{F}\{S_E\} \cdot H(v) \quad (2.6)$$

Das Ausgangssignal wird dann durch inverse Fouriertransformation ermittelt.

Die Übertragungsfunktion ( $H(v)$ ) mit ihrer Amplituden- ( $H_A(v)$ ) und Phasenübertragungsfunktion ( $H_{Ph}(v)$ ) berechnet sich wie folgt aus der Impulsantwort. [HIL]

$$H(v) = \mathcal{F}\{h(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) \cdot e^{-2\pi i v x} dx \quad (2.7)$$

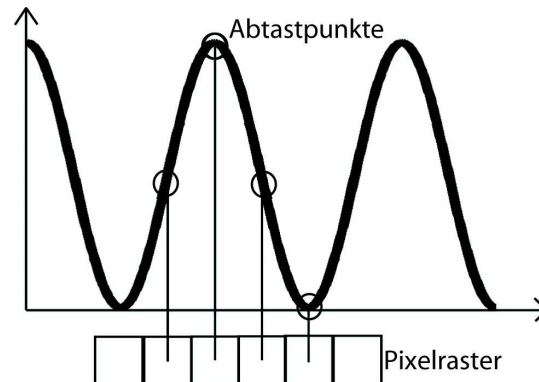
$$H_A(v) = \sqrt{H(v) \cdot H^*(v)} \quad (2.8)$$

$$H_{Ph}(v) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(H(v))}{\text{Re}(H(v))}\right) \quad (2.9)$$

## 2.2 Abtastung

### 2.2.1 CCD-Kamera

Bei einer CCD-Kamera wird ein Bild mit Bildpunkten (Pixel) endlicher Größe dargestellt. Dementsprechend kann ein Signal nicht kontinuierlich abgebildet werden, sondern es wird an durch das Pixelraster bestimmten Punkten „abgetastet“ (s. Abb. 2.6).



**Abbildung 2.6:** Abtastung durch ein Pixelraster

Die Abtastung durch die Kamera erfolgt durch Integration über die Pixelfläche. Es wird also die mittlere Helligkeit, die auf die Fläche eines Pixels fällt, berechnet und als Bildwert an dieser Stelle angenommen. Dies kann eindimensional wie folgt dargestellt werden.

$$I_k = \int_{k+0,5}^{k-0,5} a + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{g}x\right) dx \quad (2.10)$$

$k$  : Pixelnummer im Bild

$a$  : Mittelwert

$b$  : Amplitude

$g$  : Periodenlänge in Pixel

Bei einem Bild handelt es sich jedoch um eine Integration eines zweidimensionalen Signals, daher müssen die Berechnungen in diesem Abschnitt auf den zweidimensionalen Fall übertragen werden.

Eine Integration entspricht einem Tiefpassfilter, der hohe Frequenzen aus dem Bild entfernt. Ein solcher Filter besitzt die Amplitudenübertragungsfunktion

$$f(g) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{g}\right)}{\frac{\pi}{g}} = \text{sinc}\left(\frac{1}{g}\right) \quad (2.11)$$

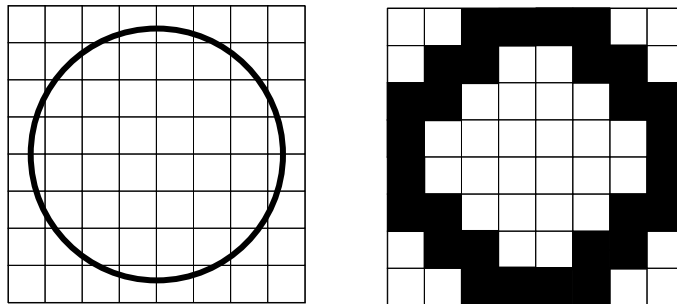
Dies kann durch Berechnung des in 2.10 aufgeführten Integrals bewiesen werden. Man erhält dann

$$I_k = a + b \cdot \text{sinc}\left(\frac{1}{g}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{g}k\right) \quad (2.12)$$

Hieraus erfolgt eine Herabsetzung des Kontrasts durch die Abtastung mit einem Faktor, der durch die Tiefpassfilterung bei der Ortsfrequenz  $\frac{1}{g}$  gegeben ist. Bei  $g = 2$  Pixel pro Periode entspricht dies zum Beispiel

$$f(2) = \text{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} \approx 0,64$$

Die Pixel einer CCD-Kamera sind in der Regel auf einem Rechteckgitter angeordnet. Dadurch ergibt sich das Problem, dass beispielsweise runde Elemente nur annähernd dargestellt werden können (s. Abb. 2.7).



**Abbildung 2.7:**

Vereinfachte Darstellung der Abtastung eines Kreises auf einem Rechteckgitter

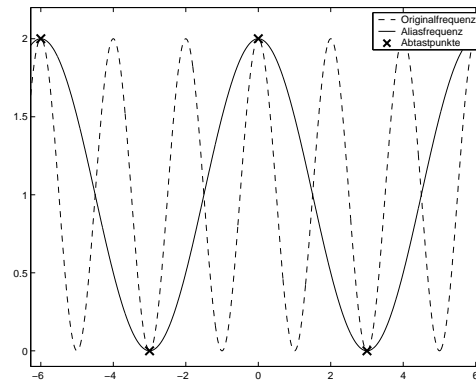
## 2.2.2 Abtasttheorem

Problematisch ist ebenfalls die Wiedergewinnung der ursprünglichen Frequenzen aus den abgetasteten Werten. Bei zu wenigen Abtastwerten pro Periode kann das Signal nicht eindeutig rekonstruiert werden (s. Abb. 2.8). Dieses Problem tritt meistens bei hohen Frequenzen auf. Allgemein gilt, dass man „mindestens zwei Abtastpunkte pro Periode für die höchste, im Signal vorkommende Frequenz“ benötigt [DBV]. Dieses ist als Abtasttheorem bekannt. Die daraus folgende so genannte Nyquist-Bedingung lautet

$$\frac{1}{x_s} \geq 2c \quad (2.13)$$

$\frac{1}{x_s}$  : Abtastfrequenz

$c$  : Nyquist-Frequenz



**Abbildung 2.8:** Entstehung einer Aliasfrequenz durch zu wenige Abtastwerte

Die Nyquist-Frequenz ist dabei die höchste darstellbare Frequenz (Grenzfrequenz). Frequenzen, die die Nyquist-Bedingung nicht erfüllen, werden durch die Abtastung falsch zugeordnet. Man nennt sie Aliasfrequenzen (s. Abb. 2.8). Dies kann zum Beispiel auftreten, wenn in einem Bildsignal hohe Frequenzen wie kleine periodische Muster, beispielsweise ein fein gestreiftes Hemd, vorkommen. Die Abtastung erzeugt an diesen Stellen langwellige Strukturen, die im Original nicht vorhanden waren. Man nennt dies auch Moiré-Effekt. [DBV]

In dieser Arbeit werden die Begriffe „oberhalb“ und „unterhalb der Nyquist-Grenze“ wie folgt genutzt. Oberhalb der Nyquist-Grenze liegen hochfrequentere, unterhalb niederfrequenzere Signale als die Nyquist-Frequenz.

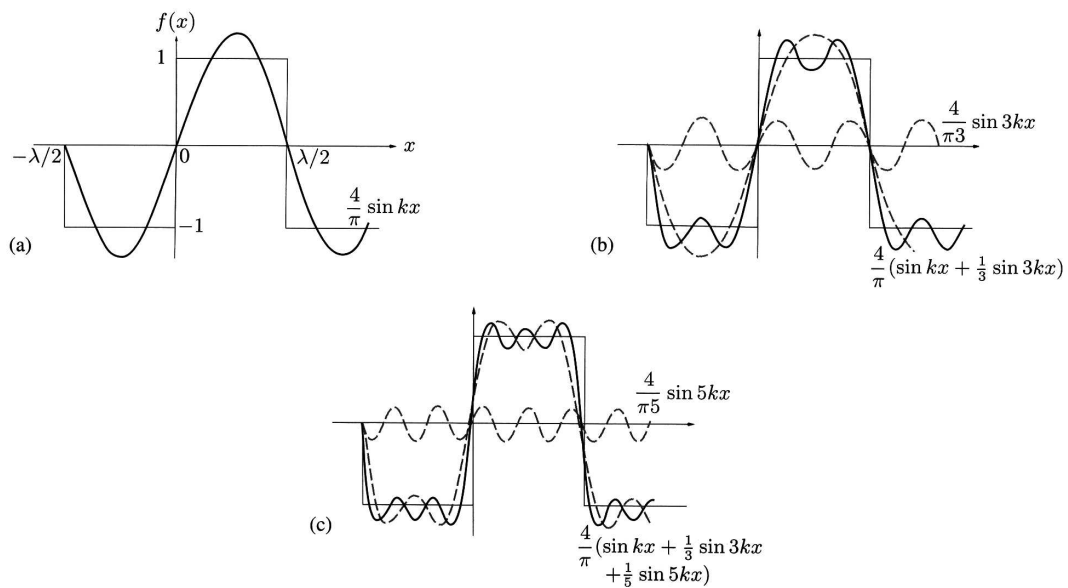
## 2.3 Verfahren zur Kontrastberechnung

### 2.3.1 Fouriertransformation

Jedes periodische Signal kann in Cosinus- und Sinusschwingungen zerlegt werden. Abbildung 2.9 zeigt dies anhand eines Rechtecksignals. Dabei wird das Signal in eine Grundschwingung (1. Harmonische) (Abb. 2.9a) und in mehrere Oberschwingungen (2. - n. Harmonische) (Abb. 2.9b und c) aufgeteilt. Die Ortsfrequenzen der Oberwellen sind hierbei ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz.

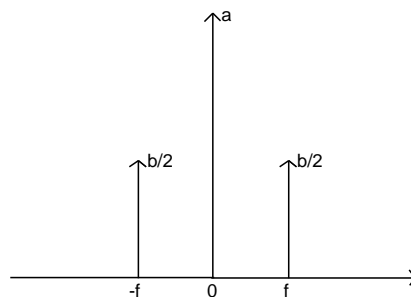
Mit Hilfe der Fouriertransformation kann man das Amplitudenspektrum eines solchen





**Abbildung 2.9:** Zusammensetzung einer periodischen Rechteckwelle [HEC]

Signals berechnen. Bei einem idealen harmonischen Signal besteht dieses nur aus dem Mittelwert  $a$  der Funktion und zweimal der halben Amplitude der Grundschwingung  $b$  (s. Abb. 2.10).



**Abbildung 2.10:** Amplitudenspektrum eines harmonischen Signals

Der Kontrast berechnet sich dann wie folgt (vgl. Gleichung 2.2).

$$Kontrast = \frac{2 \frac{b}{2}}{a} = \frac{b}{a} \tag{2.14}$$

Bei nicht harmonischen Signalen treten jedoch Oberschwingungen auf. Dabei kann die Amplitude der Grundfrequenz von der der Ausgangsfrequenz abweichen, was zu einem verfälschten Kontrastergebnis führen kann. Bei einer Rechteckschwingung ist zum

Beispiel die Amplitude der Grundschwingung größer als die des eigentlichen Rechtecksignals (s. Abb. 2.9a). Dadurch erhöht sich auch der Kontrast um denselben Faktor, um den die Amplitude vergrößert ist.

Für harmonische Signale heißt das, der Kontrast kann berechnet werden, indem man das Verhältnis aus der Amplitude der Grundschwingung  $b$  und dem Mittelwert  $a$  bestimmt. Diese Werte werden aus dem Amplitudenspektrum ermittelt, das sich durch Fouriertransformation des Signals ergibt. Bei nicht harmonischen Signalen kann die so errechnete Modulation vom korrekten Kontrast abweichen.

### 2.3.2 Phasenshiftverfahren

Bei dem hier verwendeten Vierer-Phasenshiftverfahren wird das Muster eines harmonischen Eingangssignals jeweils um  $\frac{\pi}{2}$  verschoben, das heißt, man nimmt verschiedene Bilder mit harmonischen Signalen der Form  $f(x) = a + b \cdot \cos(\delta + \varphi)$  auf, deren Phase  $\varphi$  sich jeweils um  $\frac{\pi}{2}$  verändert. Die Intensitäten auf einem beliebigen Pixel ergeben sich dann bei vier Aufnahmen wie folgt.

$$I_1 = a + b \cdot \cos(\delta) \quad (2.15)$$

$$I_2 = a + b \cos\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right) = a - b \sin(\delta) \quad (2.16)$$

$$I_3 = a + b \cos(\delta + \pi) = a - b \cos(\delta) \quad (2.17)$$

$$I_4 = a + b \cos\left(\delta + \frac{3\pi}{2}\right) = a + b \sin(\delta) \quad (2.18)$$

$a$  : Mittelwert

$b$  : Amplitude

$\delta$  : Phasenlage des harmonischen Signals an der Pixelposition

Wenn diese Gleichungen zunächst nach  $a$  aufgelöst und (2.15) mit (2.17) sowie (2.16) mit (2.18) gleichgesetzt und diese dann nach  $\sin(\delta)$  beziehungsweise  $\cos(\delta)$  umgestellt werden, lässt sich daraus die Phase der beiden Wellen mit

$$\tan(\delta) = \frac{\sin(\delta)}{\cos(\delta)} = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \Rightarrow \delta = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (2.19)$$

berechnen.

Die Ermittlung des Kontrasts erfolgt folgendermaßen.

$$K = \frac{b}{a} \quad (2.20)$$

$$a = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{4} \quad (2.21)$$

$$b = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 - 4a^2}{2}} \quad (2.22)$$

Der Faktor b kann ebenfalls durch

$$b = \sqrt{\frac{((I_2 - I_3) + (I_1 - I_4))^2 + ((I_2 + I_3) - (I_1 + I_4))^2}{8}} \quad (2.23)$$

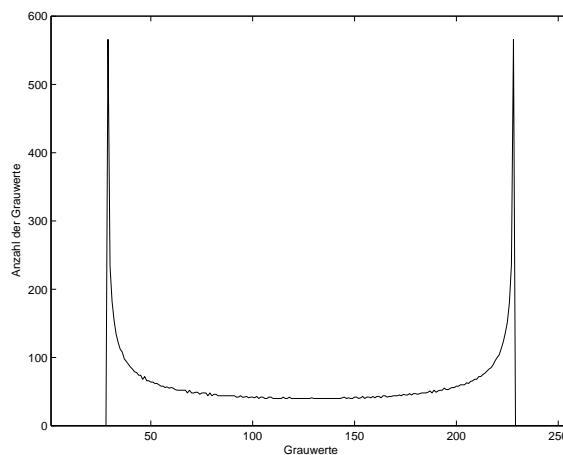
berechnet werden.

Beweisen lässt sich dies durch Einsetzen von  $I_1$  bis  $I_4$  in die Gleichungen.

Mit diesem Verfahren hat man die Möglichkeit, für jedes Pixel unabhängig von seiner Lage im Bild den Kontrast zu bestimmen. [HOL] [HAR]

### 2.3.3 Histogramm

Ein Histogramm stellt die Anzahl der jeweiligen Helligkeitswerte des Bildes dar. Ein



**Abbildung 2.11:** Histogramm einer Sinusfunktion

Histogramm über eine Frequenz der Form  $f(x) = a + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{g}x\right)$  besitzt idealerweise

Maxima an den Stellen der maximalen und minimalen Helligkeit ( $I_{max} = a + b$  und  $I_{min} = a - b$ ) und ein Minimum am Mittelwert  $a$ . Bei einer idealen Rechteckfunktion ergeben sich lediglich die Maxima bei  $I_{max}$  und  $I_{min}$ . Alle übrigen Helligkeitswerte sind dann Null. In Abbildung 2.11 ist das Histogramm einer Sinusfunktion dargestellt. Hier sind deutlich die Maxima bei  $I_{min}$  und  $I_{max}$  zu erkennen.

Nach Bestimmung der Werte für die maximale und minimale Helligkeit im Bild über das Histogramm, kann die Berechnung der Modulation nach Gleichung 2.2 erfolgen.

### 2.3.4 Fit-Verfahren

Kurzfristig wurde ein weiteres Verfahren in diese Arbeit aufgenommen, das Herr Prof. Dr. Bruno Klingen entwickelt hat. Dieses nutzt die Eigenschaft des harmonischen Siemenssterns, dass die Grauwerte des digitalisierten Bildes auf einem Kreisbogen mit gegebenen Radius  $r$  einen Intensitätsverlauf beschreiben, der eine Funktion der Form

$$I(\varphi) = a + b \cos\left(\frac{2\pi}{g}(\varphi - \varphi_0)\right) \quad (2.24)$$

darstellt.

Zunächst werden dazu die Koordinaten der Pixel bestimmt, die zum Kreisbogen mit gewähltem Radius den geringsten Abstand besitzen. Die ermittelten Bildpunkte bilden die Grundlage für die folgende Näherung des Grauwertverlaufs des Siemenssterns. Sie werden in Abhängigkeit von dem Winkel  $\varphi$  dargestellt, der sich mit

$$\varphi = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) \quad (2.25)$$

berechnet.

„Da in 2.24 die Phasenlage des Grauwertverlaufs zu einem bestimmten Winkel nicht bekannt ist, wird anstelle von 2.24 der Approximationsansatz

$$I(\varphi) = a + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{g}\varphi\right) + b_2 \cos\left(\frac{2\pi}{g}\varphi\right) \quad (2.26)$$

gewählt.“ [KLS]

Die Amplitude  $b$  ergibt sich durch

$$b = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad (2.27)$$

Mit dieser Approximations-Methode der kleinsten Quadrate, deren Prinzip in jedem Fachbuch über Numerische Methoden der Mathematik nachzulesen ist (vgl. z.B. [BJO]), werden somit aus den bekannten Werten der Winkel  $\varphi$  sowie der dazu gehörenden Grauwerte  $I(\varphi)$  mit Hilfe einer Näherung zu Gleichung 2.26 die Unbekannten  $a$  und  $b$  ermittelt. Sie erlauben die Kontrastberechnung nach Gleichung 2.2. [KLS]

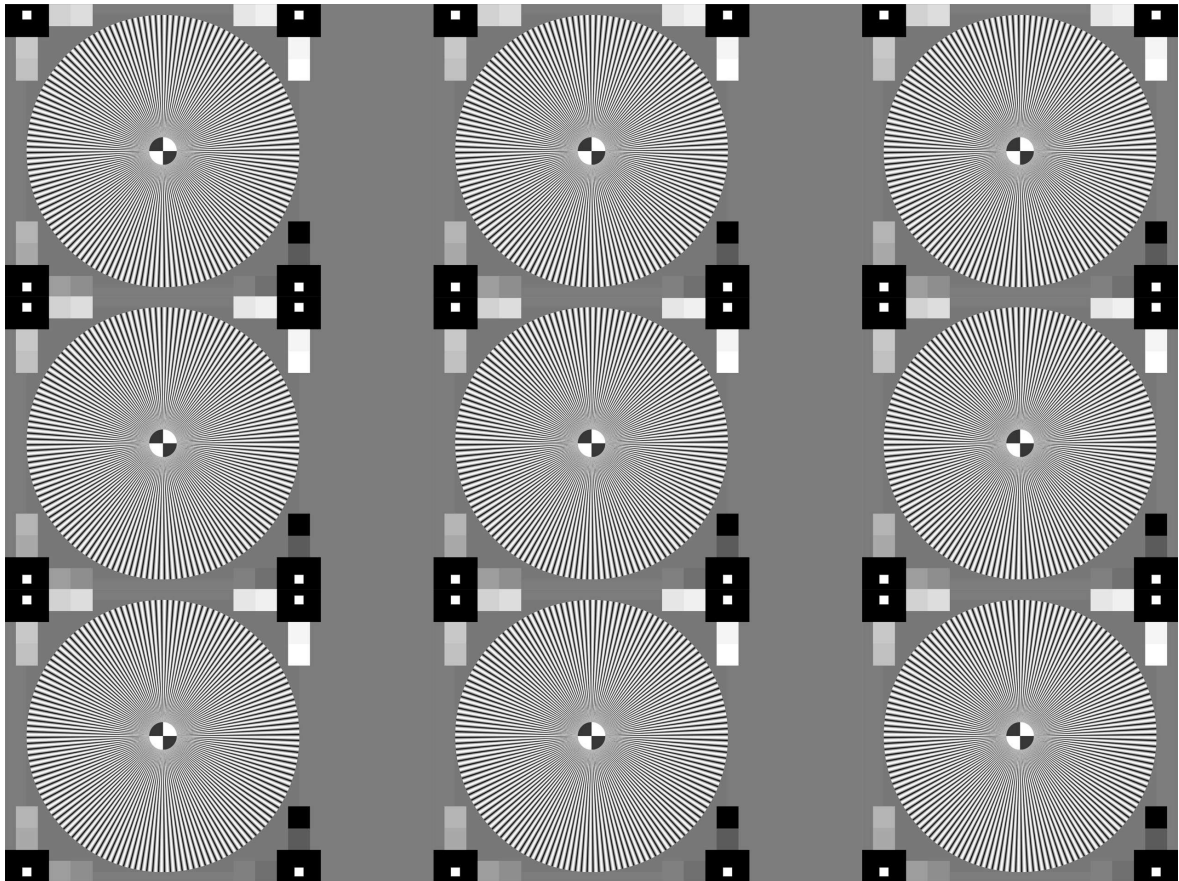
# 3 Testaufbau

## 3.1 Testchart

Das fertige Testchart zur Auflösungsmessung mit harmonischen Siemenssternen (Begründungen für die Wahl dieses Verfahrens liefert Kap. 5.1), welches für diese Diplomarbeit erstellt wurde, hat eine Größe von insgesamt 108 cm (B) x 81 cm (H). Dies entspricht dem Bildverhältnis digitaler Kameras von 4:3. Insgesamt sind auf dem Testchart neun harmonische Siemenssterne auf mittelgrauem Hintergrund montiert (s. Abb. 3.1). Dieser soll die Belichtungsmessung der Kamera unterstützen und eine mögliche Über- oder Unterbelichtung verhindern. Um jeden Siemensstern sind 16 Graufelder angeordnet, die einem linearen Grauverlauf von 0 bis 255 in gleichabständigen Stufen entsprechen. Zusätzlich ist an den Ecken jedes Elements ein weißes Quadrat auf schwarzem Grund platziert. Diese dienen zur Auffindung der Mittelpunkte der Siemenssterne mittels des Schwerpunktverfahrens (s. Kap. 4.2.2). Die mittleren Regionen jedes Sterns sind mit einem s/w-Muster ausgeblendet, das die Scharfstellung der Kameras mittels Autofokus unterstützt. Der Hauptgrund für diese Mittenausblendung liegt jedoch in der Tatsache, dass das benutzte Druckverfahren eine zu geringe Auflösung hat, um die hochfrequenten mittleren Bildregionen ausreichend darstellen zu können.

Der Druck des Charts stellt ein Problem dar. Für den Druck des Auffichttestcharts wurde bislang ein Tintenstrahldrucker verwendet, da ein Druckverfahren mit höherer Auflösung, das gleichzeitig auch die Möglichkeit des Graustufenausdrucks bietet, nicht gefunden werden konnte.

Es bleibt hier festzustellen, dass die bisherige Lösung zur Erstellung des Testcharts nicht das einzig mögliche Verfahren darstellt. Jedem Anwender ist es dementsprechend



**Abbildung 3.1:** Testchart mit harmonischen Siemenssternen

selbst überlassen, wie er dieses konzipieren möchte. So kann zum Beispiel auch anstelle des Aufsicht- ein Durchlichtchart produziert werden. Dieses hat den Vorteil, dass Belichtungsverfahren für Durchlichtmaterialien derzeit ein höheres Auflösungsvermögen bieten, allerdings ist dabei die Größe des Bildes auf ca. 18 x 24 cm begrenzt. Wenn eine größere Fläche mit beispielsweise neun Siemenssternen abgedeckt werden soll, wäre es aber auch möglich, jeden Stern einzeln zu produzieren und jeweils zu durchleuchten. Auch beim bisherigen Testchart wurden die Sternelemente einzeln gedruckt und zum Gesamtchart montiert.

Es wäre ebenfalls möglich, die Elemente auf Monitoren darzustellen. Hierbei ist die Auflösung durch die des Monitors begrenzt.

## 3.2 Testbedingungen

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Auflösungstests wurde darauf geachtet, dass das Testchart homogen ausgeleuchtet ist. Dies ist wichtig, damit durch einen Lichtabfall am Rand der Kontrast nicht künstlich verändert wird. Ferner wurde ein gleichbleibender Abstand zum Testchart eingehalten, damit die Ergebnisse verschiedener Kameras untereinander vergleichbar sind. Bei der Aufnahme sollte immer darauf geachtet werden, dass das Bild weder über- noch unterbelichtet ist, da sich sonst falsche Kontrastwerte ergeben können.

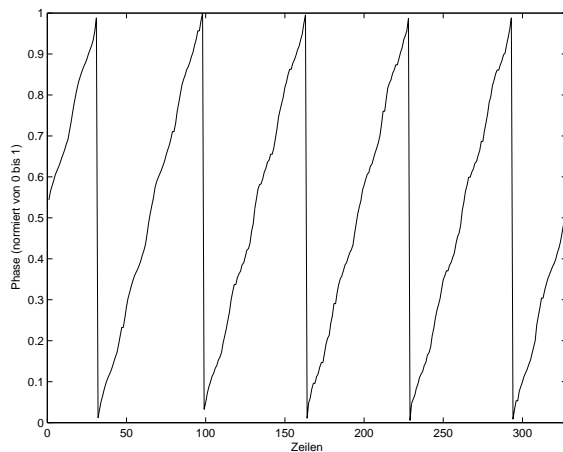
Für weitere Erläuterungen zu den Testbedingungen verweise ich an dieser Stelle auf die bestehende ISO-Norm [ISO].

## 3.3 Linearisierung von Vorlage und Kamera

Zur Berechnung des Kontrasts mittels des Phasenshiftverfahrens muss ein harmonisches Eingangssignal gegeben sein. Sobald ein nichtharmonisches Signal zur Berechnung genutzt wird, kann dementsprechend der Kontrast nicht mehr korrekt ermittelt werden. Ein nichtharmonisches Signal kann man dabei unter anderem durch einen nichtlinearen Phasenverlauf erkennen (s. Abb. 3.2). Ferner besteht die Möglichkeit, den Verlauf der Helligkeitswerte entlang einer Zeile oder im Falle eines Siemenssterns entlang eines Umfangs mit einem gewählten Radius zu betrachten (s. Abb. 3.3). Hier wurde ein Cosinusverlauf mit dem Kamerabild der Canon Powershot G1 verglichen. Zur Erklärung soll hier angefügt werden, dass alle in diesem Kapitel zu sehenden Grafiken, die auf Kamerabilder verweisen mit dem oben genannten Modell erstellt wurden. Ferner wurde zur Messung eines Monitors ein TFT-Display der Firma iiyama verwendet.

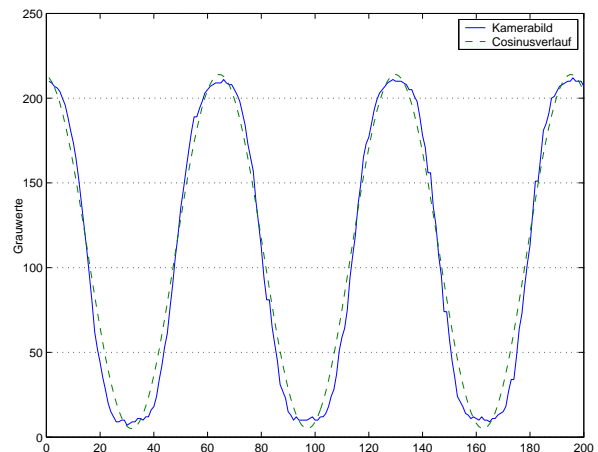
Abbildung 3.3 zeigt, dass der Helligkeitsverlauf des Kamerabildes keinesfalls dem Cosinusverlauf entspricht. In diesem Fall war dadurch der mit dem nichtharmonischen Signal errechnete Kontrastwert geringer als der erwartete Wert. Da nicht bekannt war, ob der Monitor oder die Kamera die Signalform veränderte, wurde zunächst der Monitor kalibriert. Hierfür wurden dem Monitor nacheinander 16 Graufelder angeboten, die





**Abbildung 3.2:**

Nichtlinearer Phasenverlauf eines Kamerabildes

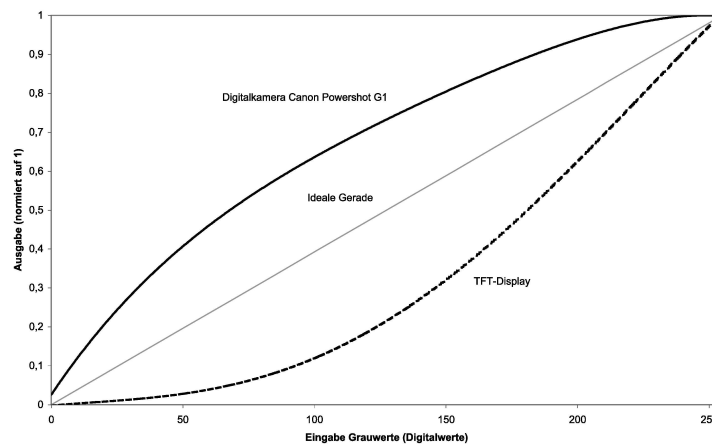


**Abbildung 3.3:**

Vergleich eines Cosinusverlaufs mit dem Kamerabild

wie im fertigen Testchart einen Grauverlauf von 0 bis 255 in Stufen von 17 Digitalwerten darstellen. Die Leuchtdichte dieser Felder wurde gemessen und die Ergebnisse in Abhängigkeit von den ursprünglich eingegeben Grauwerten dargestellt. Es stellte sich heraus, dass es sich bei dem verwendeten Monitor um ein nichtlineares System mit der in Abbildung 3.4 zu sehenden Gradationskurve handelt. Zum Vergleich wurde hier der gewünschte lineare Gradationsverlauf (Ideale Gerade) dargestellt. Um nun der Kamera ein harmonisches Signal anbieten zu können, musste das Testbild linearisiert werden. Dazu wurde eine Look-up-table (LUT) errechnet, die angibt, welche Digitalwerte dem Monitor übergeben werden müssen, damit dieser die korrekten Helligkeitswerte ausgibt.

Danach wurde erneut ein Kamerabild mit einem gewünschten Cosinusverlauf verglichen. Es ergab sich, dass das Bild noch kein harmonisches Signal darstellte. Daher wurde nun auch die Gradationskurve der Kamera bestimmt, indem wiederum die 16 Graufelder fotografiert und ausgemessen wurden. Der Gradationsverlauf wich ebenfalls von dem gewünschten linearen Verlauf ab (s. Abb. 3.4). Daraus resultierte die Notwendigkeit, das Bild der Kamera ebenfalls zu linearisieren. Dazu wird zu den Kamerawerten eine Näherung für ein Polynom 4. Grades errechnet, aus dem mit Hilfe der gewünschten linearen Werte die LUT über die Matlab-Funktion „polyfit“ ermittelt



**Abbildung 3.4:** Gradationskurve von Monitor und Digitalkamera

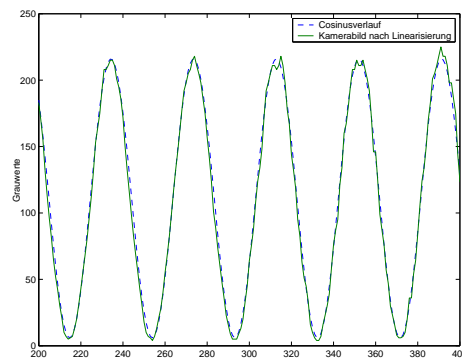
wird. Es erfolgt keine Spreizung der Bilddaten auf Werte von 0 bis 255.

Ein Problem dieser Art der Linearisierung liegt darin, dass bei einer Durchführung wie oben beschrieben der maximal mögliche Kontrast nie gleich Eins werden kann, da digitale Kameras oft den Wert des schwarzen Feldes auf dem Testchart nicht als Helligkeitswert 0 annehmen. Bei einem dann bestimmten Wert für  $I_{min}$ , der größer als Null ist, ergibt sich nach Gleichung 2.2 eine maximale Modulation kleiner Eins. Um dies zu vermeiden, muss das Eingangssignal zur Kontrastmessung reduziert werden, sodass es sich innerhalb des Aussteuerbereichs digitaler Kameras befindet, zum Beispiel in einem Bereich von Digitalwert 40 bis 210. Der Aussteuerbereich einer Digitalkamera bezeichnet den Bereich zwischen  $I_{min}$  und  $I_{max}$ , den die Kamera maximal darstellen kann. Um den richtigen Kontrast der Kamera bei einem reduzierten Eingangssignal zu ermitteln, muss man nach Gleichung 2.3 den Quotienten aus Ausgangs- und Eingangskontrast bestimmen. Der Kontrast ist dabei nur abhängig vom Mittelwert des Eingangssignals. Wenn durch Verschiebung des Mittelwertes der Aussteuerbereich verlassen wird beziehungsweise wenn die Grenzen des Eingangssignals außerhalb des Aussteuerbereichs der Kamera liegen, wird der Kontrast reduziert.

Eine weitere Möglichkeit einen maximalen Kontrast von Eins zu erhalten, besteht darin, den Offset des Kamerasignals abzuziehen. Dazu bestimmt man den Wert, den die Kamera für ein schwarzes Feld angibt (Offset) und subtrahiert diesen von allen Helligkeitswerten, die die Kamera ermittelt. Dadurch wird ein Grauwertbereich, der sich

zunächst zwischen 20 und 200 befindet, auf einen Bereich zwischen 0 und 180 verschoben. Dabei erfolgt keine Spreizung der Helligkeitswerte, es handelt sich lediglich um eine Verschiebung. Diese Methode wird für die Linearisierung in dieser Arbeit verwendet.

Nach der Linearisierung des Kamerabildes ergab sich nun ein harmonischer Verlauf der Helligkeitswerte (s. Abb. 3.5). Es bleibt festzustellen, dass für die Berechnung der



**Abbildung 3.5:** Vergleich von Cosinusverlauf und Kamerabild nach der Linearisierung

Modulation mittels des Phasenshiftverfahrens ein linearer Grauverlauf des Testcharts wichtig ist. Dementsprechend muss der Drucker, Monitor oder Belichter, mit dem das Testchart ausgegeben wird, linearisiert werden, bevor die Ausgabe des Charts erfolgt, damit der Kamera bereits ein harmonisches Signal als Objekt angeboten wird. Ferner muss eine Linearisierung des Kamerabildes erfolgen. Dafür werden die 16 auf dem Testchart montierten Graufelder benötigt. Sie gewährleisten, dass die berechnete LUT an die Aufnahmebedingungen angepasst ist und demnach ein möglichst optimales harmonisches Signal zur Kontrastmessung verwendet werden kann.

Die Linearisierung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch bei den anderen Auswertungsverfahren durchgeführt. Dies ist sinnvoll, um eine mögliche Fehlerquelle durch einen nichtlinearen Grauverlauf bei einem harmonischen Siemensstern ausschließen zu können.

# 4 Durchführung der Auswertung

## 4.1 Matlab 6.5

Die Programme für diese Diplomarbeit sind hauptsächlich mit Matlab 6.5 erstellt worden. Die Wahl dieses Programms fiel von Seiten der Firma Image Engineering aufgrund der Tatsache, dass es mittlerweile ein weit verbreitetes Tool für technische Arbeiten darstellt.

Matlab 6.5 setzt sich aus einem Grundprogramm und vielen zusätzlichen Toolboxen zusammen. Die Arbeitsoberfläche (s. Abb. 4.1) besteht zunächst aus einem „Command Window“, in das die auszuführenden Befehle eingegeben werden. Prinzipiell kann dieses Fenster wie ein Taschenrechner angesehen werden, in den die zu berechnenden Gleichungen einzugeben sind. Die Ergebnisse kann man in Variablen abspeichern, die im „Workspace“ (s. Abb. 4.1) angezeigt werden. Neben einfachen Rechnungen ist auch die Programmierung komplexerer Tools möglich. Die Speicherung kann als „m-file“ – ein spezielles Matlab-Format – erfolgen. Aus solchen „m-files“ setzen sich prinzipiell auch die Toolboxen zusammen. Sie bestehen aus Programmroutinen, die für ein bestimmtes Themengebiet genutzt werden können. So enthält zum Beispiel die „Image Processing Toolbox“ spezielle Methoden für die Bildverarbeitung. Ferner gibt es beispielsweise einen bereits fertigen Befehl zur Durchführung der diskreten Fouriertransformation (vgl. Kap. 4.3.1). Hierdurch kann vielfach auf bereits existierende Routinen zurückgegriffen werden, und die Zeit für das Programmieren ist anderweitig nutzbar.

Ein Nachteil von Matlab besteht darin, dass es bei der Nutzung von Schleifen nicht effizient arbeitet. Dagegen können „Vektoren und Matrizen schnell verarbeitet und Vektor- und Matrixoperationen schnell ausgeführt“ werden [GRA]. Daher sollte der

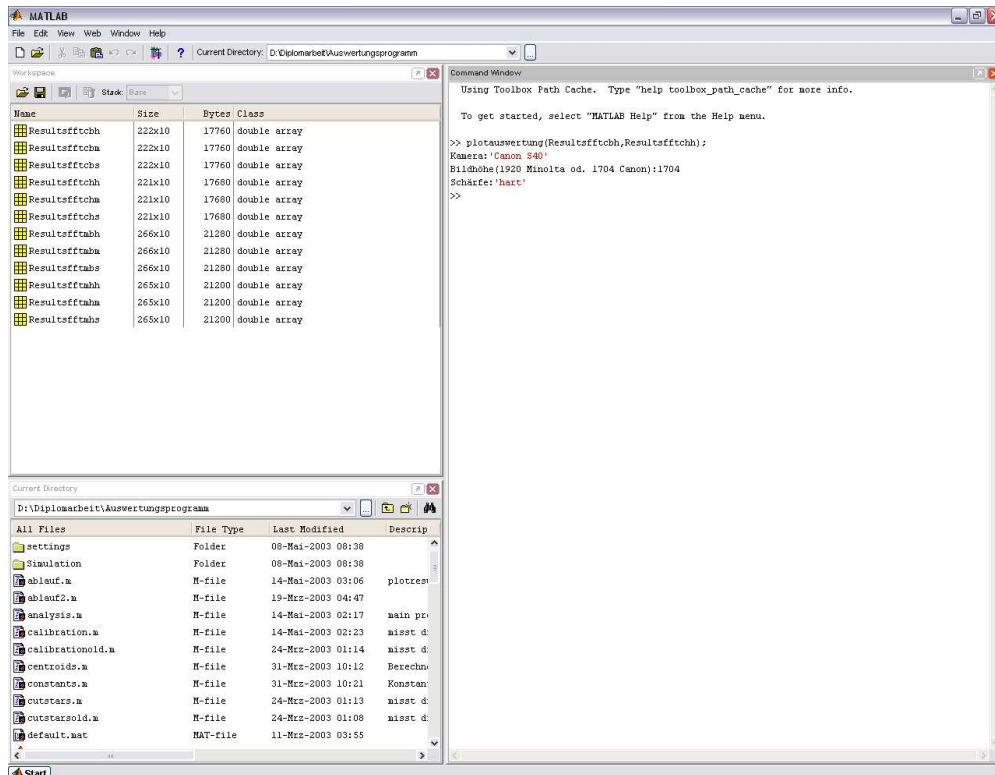


Abbildung 4.1: Screenshot der Matlab 6.5-Oberfläche

Nutzer Schleifen so gut es geht vermeiden, was jedoch nicht immer möglich ist.

Der eingebaute „Profilierer“ hilft „Zeitfresser“ im Programm zu entdecken. Er zeigt, nachdem er das Programm einmal durchlaufen hat, die Gesamtzeit und die Zeit der einzelnen Programmteile an. Diese werden übersichtlich nach verbrauchter Zeit geordnet, sodass der Anwender zum Beispiel unnötige Schleifen schnell entfernen kann.

Ein weiteres hilfreiches Tool ist das „Graphical User Interface“, kurz „GUIDE“. Hiermit hat man die Möglichkeit, auf einfache Weise graphische Benutzeroberflächen für seine Programme zu schreiben. Auch die Oberfläche des Auswertungsprogramms, das für diese Arbeit angefertigt wurde, ist mit „GUIDE“ erstellt worden.

Im Gegensatz zur Angabe eines Punktes in einem Koordinatensystem bezeichnet Matlab – wie in der Bildverarbeitung und bei Matrizen üblich – die Spalten einer Matrix  $M(y,x)$  mit der Koordinate  $x$  sowie die Zeilen mit  $y$ . Die Nummerierung der Zeilen erfolgt von oben nach unten und die der Spalten wie gewohnt von links nach rechts. Dies wird auch im Folgenden so verwendet.

## 4.2 Auswertungsprogramm

In den folgenden Abschnitten werden einzelne Abläufe erläutert, die wichtig sind für das während dieser Arbeit erstellte Programm zur Messung des Auflösungsvermögens digitaler Kameras. Die Auswertungsverfahren, die in diesem Programm verwendet werden, erläutert Kapitel 4.3. Einen Überblick über die Programmstruktur gibt Abbildung 4.2.

### 4.2.1 Datenerfassung

Zunächst müssen die Bilddaten auf der Festplatte des Computers gespeichert werden, da das Auswertungsprogramm diese nicht direkt von der Kamera einliest. Es können in Matlab generell diverse Grafik- und Bilddateiformate eingelesen werden. In diesem Programm werden lediglich die Dateiformate „JPEG“ (Joint Photographic Experts Group), „TIFF“ (Tag(ged) Image File Format) und „BMP“ (Bitmap) genutzt, die als Standardbildformate gelten können.

Sollen eine Folge von Dateien mit gleichen Einstellungen wie Objektabstand, Brennweite, Bildausschnitt etc. eingelesen werden, müssen diese fortlaufend nummeriert sein. Bei Angabe von Pfad und Dateiname der ersten Datei werden dann automatisch die folgenden durchnummerierten Bilder eingelesen.

In der Regel erfolgt die Auswahl einer Datei über das Feld „Suchen...“. Dabei wird die Windows-Routine zum Öffnen von Dateien angesprochen, welche ein weiteres Fenster öffnet, aus dem die einzulesende Datei ausgewählt wird. Es ist auch möglich, Dateiname und Pfad manuell einzugeben.

Das Einlesen der Daten erfolgt mit Hilfe des Befehls „imread“ aus der „Image Processing Toolbox“. Dieser ermöglicht das Einlesen von Bilddaten in eine Matrix mit einer Größe, die der Pixelzahl entspricht. Während ein Graustufenbild eine eindimensionale Matrix bildet, besteht ein RGB-Bild aus einer dreidimensionalen Matrix. Diese Eigenschaft wird genutzt, um festzustellen, ob es sich bei dem importierten Bild um ein Farb- oder Grauwertbild handelt. Im Falle eines RGB-Bildes wird dieses dann mit Hilfe der Matlab-Routine „rgb2gray“ in Graustufen konvertiert. Hierbei wird das Bild zunächst

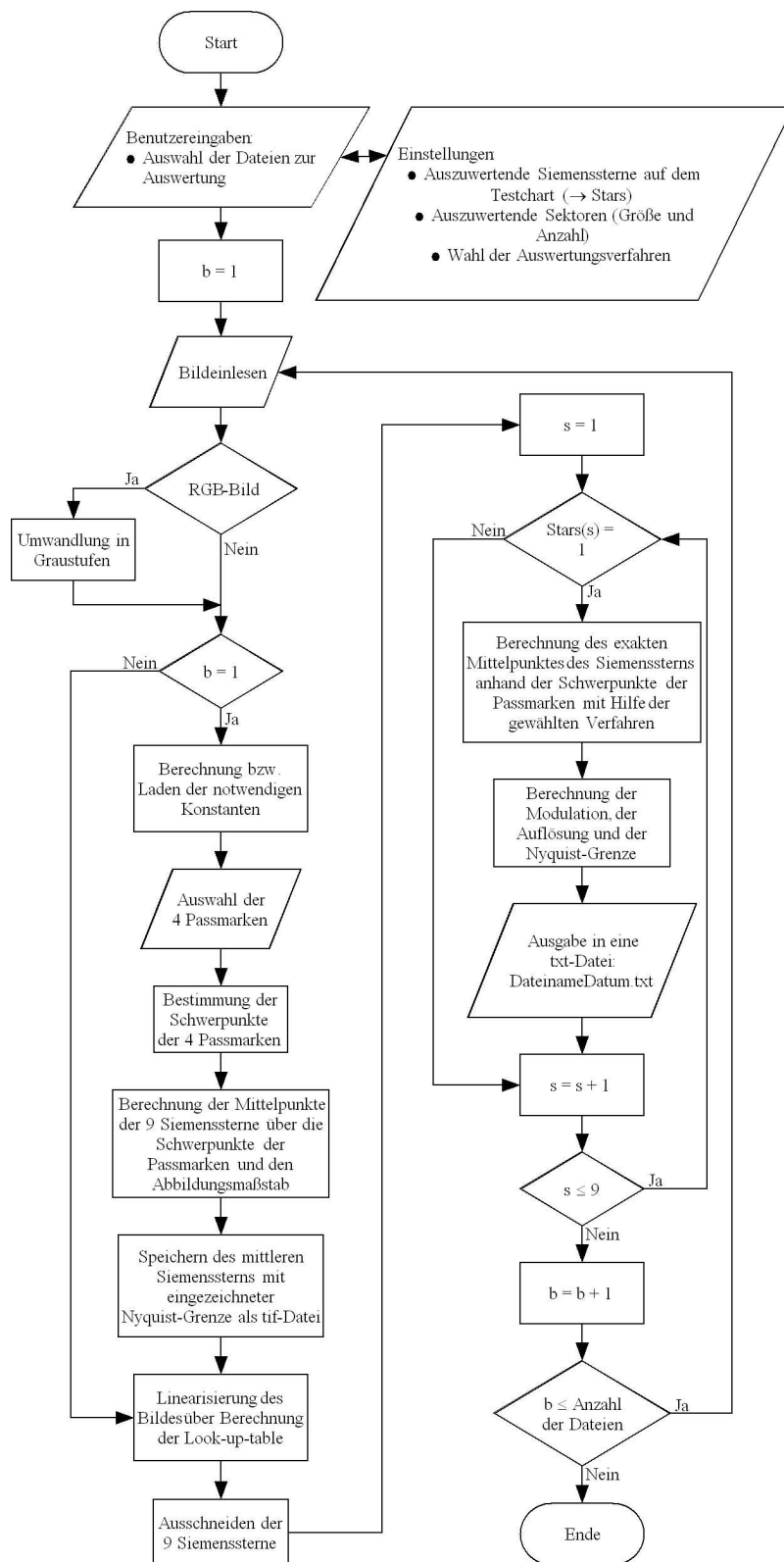


Abbildung 4.2: Grundstruktur des Auswertungsprogramms

in NTSC-Koordinaten umgewandelt und die Werte für Farbton und Sättigung auf Null gesetzt, um dann in den RGB-Farbraum zurück konvertiert zu werden. [MA1] Bei dieser Umwandlung macht man sich zunutze, dass „sich Farbwerte auch durch die Angabe der drei Größen Helligkeit, Farbton und Farbsättigung beschreiben“ lassen [WEB]. Dabei bleibt nur noch das Helligkeits- bzw. Luminanzsignal ( $Y$ ) zurück, wenn die anderen beiden Werte auf Null gesetzt werden. Dieses wird mit Hilfe folgender Gleichung aus den drei Farbauszügen berechnet.

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B \quad (4.1)$$

Hierbei wird entsprechend der Empfindlichkeitskurve des Auges ( $V(\lambda)$ -Kurve) der Helligkeitswert aus den drei Farbwerten für Rot, Grün und Blau bestimmt. Am Ende dieses Vorgangs besitzt die Matrix nur noch eine Ebene, die das Luminanzsignal enthält. Im weiteren Programm wird dieses Graustufenbild weiter ausgewertet.

Sollte es gewünscht sein, nur einen der drei Farbauszüge auszuwerten, muss dieser vorher in einem Bildbearbeitungsprogramm extrahiert und als Graustufenbild abgespeichert werden.

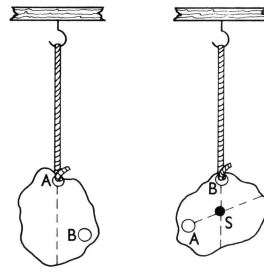
## 4.2.2 Schwerpunktverfahren

Bei diesem Verfahren wird der Schwerpunkt eines Bildelements bestimmt, um davon ausgehend den Mittelpunkt des Siemenssterns berechnen zu können. Den Schwerpunkt oder Massenmittelpunkt eines Körpers kann man sich „als Angriffspunkt der Schwerkraft denken“ [SDP]. Abbildung 4.3 zeigt einen an einem Band hängenden Körper. Bei alleiniger Einwirkung der Schwerkraft auf diesen Körper befindet sich der Schwerpunkt hierbei „senkrecht unter dem Aufhängepunkt“ [SDP]. Wird er an zwei Punkten nacheinander aufgehängt, kann der Massenmittelpunkt durch die sich dann ergebenden Schwerlinien (s. Abb. 4.3) bestimmt werden.

Rechnerisch ergibt sich der Ortsvektor  $\vec{r}_s$  des Schwerpunkts bei diskreter Massenverteilung wie folgt [SDP].

$$\vec{r}_s = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4.2)$$





**Abbildung 4.3:** Schwerpunkt eines Körpers [SDP]

$m_i$  : Masse eines Punktes

$\vec{r}_i$  : Ortsvektoren mit  $i = 1, \dots, n$

$n$  : diskrete Massenpunkte

Der Schwerpunkt wird in dem in dieser Arbeit vorgestellten Programm für eine ausschließlich für diese Berechnung erstellte Marke bestimmt. Dies ist ein weißes Quadrat auf schwarzem Grund (vgl. Kap. 3.1). Es wird zunächst ein Bereich dieser Marke festgelegt, über den der Schwerpunkt bestimmt werden soll. Der Bereich muss noch innerhalb des schwarzen Rahmens liegen aber das weiße Quadrat vollkommen beinhalten. So wird gewährleistet, dass der Schwerpunkt des kompletten weißen Bereichs berechnet wird und keine Einflüsse von grauen Helligkeitswerten das Ergebnis verfälschen. Da das Bild zweidimensional ist, muss der Schwerpunkt für die x- und für die y-Koordinate bestimmt werden. Analog zu Gleichung 4.2 ergibt sich dann für  $S_x$  und  $S_y$

$$S_x = \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n I(y, x) \cdot x}{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n I(y, x)} \quad (4.3)$$

$$S_y = \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n I(y, x) \cdot y}{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n I(y, x)} \quad (4.4)$$

$x$  : x-Koordinate des Bildpunktes

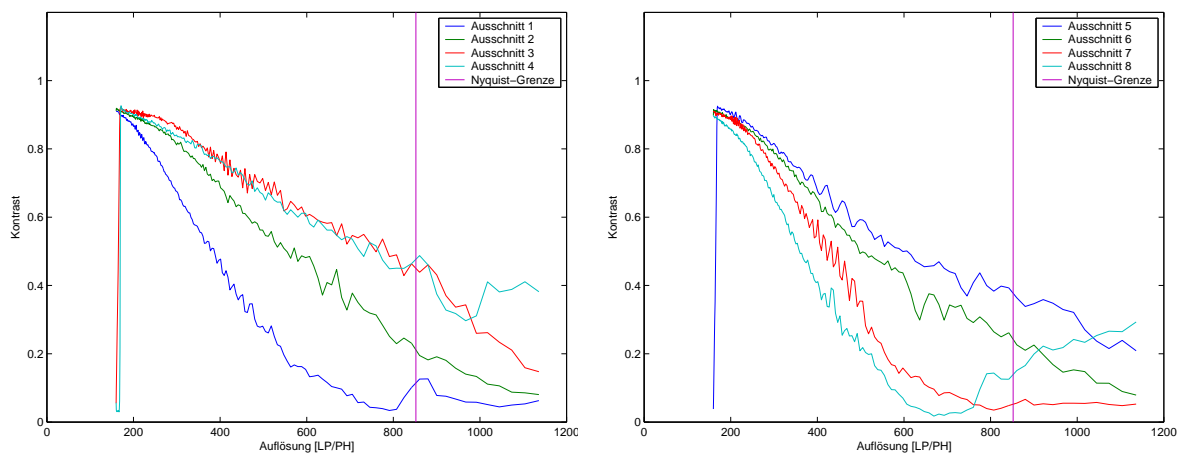
$y$  : y-Koordinate des Bildpunktes

$I(y, x)$  : Helligkeitswert (0 - 255) am Bildpunkt y,x

Nach Bestimmung der Koordinaten der Mittelpunkte aller vier Markierungen, die einen Siemensstern umgeben (s. Abb. 3.1), sind genügend Werte vorhanden um seinen Mittelpunkt zu finden. Das Verfahren stellte sich als ausreichend robust und reproduzierbar

heraus. Auch bei unterschiedlichsten Verkippungen der Kamera konnte der Mittelpunkt noch mit einer maximalen Abweichung von 1 Pixel bestimmt werden. Allerdings zeigt sich, dass bei Berechnung des Mittelpunktes aus den Diagonalen, die zwischen den vier Markierungen verlaufen, die Fehleranfälligkeit vor allem bei verkippten oder verzeichneten Aufnahmen steigt. Daher wurde es in diesem Programm vorgezogen, die x-Koordinate über die beiden linken und rechten Markierungen sowie die y-Koordinate über die beiden oberen und unteren Markierungen zu bestimmen.

Falls der Schwerpunkt einmal nicht optimal bestimmt worden sein sollte, macht sich dieses in den Ergebnissen bemerkbar. Zu erkennen ist das Problem an einem starken Abfall des Kontrasts bei niedrigen Frequenzen in den Sektoren, in deren Richtung der Mittelpunkt verschoben ist, da dort schon der graue Hintergrund des Charts gemessen wird. Die gegenüberliegenden Sektoren zeigen bei starker Schwerpunktverschiebung einen schnelleren Abfall der Übertragungsfunktion und einen „angeblichen“ Wiederanstieg des Kontrastes bei hohen Frequenzen. In Abbildung 4.4 wird deutlich, dass der



**Abbildung 4.4:** MTF-Ergebnis bei verschobenem Schwerpunkt

Mittelpunkt in Richtung der Segmente Drei, Vier und Fünf verschoben ist (zur Einteilung eines Siemenssterns in Segmente vgl. Abb. 4.6). Hier fällt der Kontrast zum Rand des Sterns wieder stark ab. In Ausschnitt Acht hingegen, steigt er bei hohen Frequenzen wieder an. Bei einer zu starken Fehlberechnung des Schwerpunktes kann es auch zu einem Abbruch des Programms seitens Matlab kommen, wenn am Rand

des Testcharts aufgrund der „Mittelpunktverschiebung“ Punkte ausgewertet werden sollen, die in der Matrix nicht vorhanden sind. Dies wären zum Beispiel Punkte mit negativen Koordinaten.

Da zu Beginn der Berechnungen der Benutzer die äußeren vier Markierungen des Testcharts per Hand auswählen muss, um die Grenzen des Bildes festzulegen beziehungsweise Ausgangspunkte für die weiteren Berechnungen zu bestimmen, können hier leicht Fehler entstehen, die später zu einer falschen Berechnung der Mittelpunkte der Siemenssterne führen. Diese Fehler sind jedoch leicht zu beheben, indem das Programm erneut ausgeführt und die Auswahl der Markierungen verbessert wird.

Probleme hat diese Berechnungsweise jedoch bei starker Verzeichnung, wenn wie hier nur vier Eckpunkte ausgewählt werden. Der Mittelpunkt des mittleren Siemenssterns wird zwar weiterhin genau gefunden, aber bei den Sternen am Rand kann es zu fehlerhafter Schwerpunktberechnung kommen. Aus Zeitgründen konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit keine Verbesserung mehr vorgenommen werden. Es kann daher lediglich empfohlen werden, starke Verzeichnung zu vermeiden, indem beispielsweise der für Verzeichnung anfällige Weitwinkelbereich vermieden wird. Dies kann durch größere Entfernung zum Testchart und gleichzeitige Nutzung einer größeren Brennweite geschehen.

Eine Möglichkeit die Siemenssterne auf sichere und einfache Weise automatisch aufzufinden besteht darin, auf das Testchart rote Markierungen zum Beispiel rote Punkte oder Quadrate aufzubringen. Ein Vorschlag ist, sie anstelle der Autofokus-Markierungen in der Mitte der vier Siemenssterne Nummer Zwei, Vier, Sechs und Acht (s. Abb. 4.5) zu montieren. Optimal ist es, wenn sie exakt in der Mitte des Sterns liegen. Bei einem Graustufenausdruck des Testcharts können die „roten Punkte“ notfalls auch nach dem Druck der Sterne aufgeklebt werden. Dann ist es jedoch wichtig, dass nach dem Ausschneiden der einzelnen Siemenssterne ihre exakten Mittelpunkte über die vier Markierungen (s.o.) bestimmt werden können. Bei vier roten Punkten ergibt sich ebenfalls eine ungenaue Mittelpunktsberechnung bei starker Verzeichnung. Dies kann durch Montage roter Punkte auf alle Siemenssterne verhindert werden.

Das Auffinden der „roten Punkte“ erfolgt ebenfalls über das Schwerpunktverfahren. Es wird hier ausgenutzt, dass es sich bei digitalen Kameras vorwiegend um Farbkameras

handelt. Da zunächst das RGB-Bild eingelesen wird, kann der rote Farbauszug noch vor Konvertierung in ein Graustufenbild extrahiert werden. Von diesem wird dann entweder der grüne oder der blaue Farbauszug subtrahiert. Dadurch werden all die Stellen im Bild aus dem Rotauszug entfernt, die Grau sind und nicht hauptsächlich Rot enthalten. Das Differenzbild beinhaltet dann nur noch die Rotanteile der vier beziehungsweise neun roten Punkte. Die Mitte jedes Punktes wird nun durch Aufteilung des Gesamtbildes in vier beziehungsweise neun Teile und Anwendung des Schwerpunktverfahrens auf diese gefunden. Erste Tests mit realen Bildern waren erfolgreich. Es wurde jedoch nicht weiterverfolgt, da das Verfahren bei s/w-Kameras nicht funktioniert.

Ein Kompromiss, dieses Verfahren doch anzuwenden, besteht im Einbau einer Auswahlmöglichkeit in die Benutzeroberfläche, sodass vorher angegeben werden kann, ob ein s/w- oder ein Farbbild eingelesen wird.

### 4.2.3 Linearisierung und Auswahl der Siemenssterne

Wie in Kapitel 3.3 bereits erwähnt, ist es sinnvoll, das Bild des harmonischen Siemenssterns zu linearisieren. Dadurch wird gewährleistet, dass ein harmonisches Signal für die Auswertung zur Verfügung steht. Bei den Vergleichen der unterschiedlichen Verfahren (s. Kap. 5.1) wurde auch der binäre Siemensstern linearisiert, damit gleiche Ausgangsbedingungen gelten.

Die Linearisierung der Bilder erfolgt nur einmal über jedes Bild und nicht über jeden Siemensstern des Testcharts separat, da die berechnete Gradationskurve für das komplette Bild gilt. Es wird jedoch über jede Aufnahme, auch wenn diese zu einer Serie gehört, die direkt nacheinander ohne Einstellungsänderungen aufgenommen wurde, eine Linearisierung durchgeführt, weil es zu Belichtungsunterschieden seitens der Kamera kommen kann.

Um optimale Messergebnisse zu erzielen, ist das Testchart homogen auszuleuchten (s. Kap. 3.2). Ferner sollte eine Belichtungskontrolle erfolgen, die eine Über- beziehungsweise Unterbelichtung verhindert, da diese zu verringerten Modulationsergebnissen führt.

Die Linearisierung selbst erfolgt wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Es werden zur Berech-

nung der Look-up-table (LUT) die 16 Graufelder, die um den mittleren Siemensstern des Testcharts angeordnet sind, herangezogen. Es ist notwendig, dass sich die Felder mit auf dem Testchart befinden, da es sonst zu Belichtungsunterschieden zwischen den Aufnahmen des Testcharts und der separaten Graufelder kommen kann. Dies kann dazu führen, dass bei der Anwendung der so berechneten LUT die Helligkeitswerte des Testbildes gespreizt und im Extremfall in den hellen oder dunklen Partien abgeschnitten werden (Clipping). Dadurch wird der Kontrast verändert.

Nach der Linearisierung des Bildes werden die Siemenssterne in gleicher Größe ausgeschnitten und in einer eigenen Matrix gespeichert. Hierdurch kann Matlab ab diesem Zeitpunkt die weiteren Berechnungen mit kleineren Matrizen durchführen.

#### 4.2.4 Auflösungsrechnung

Die Auflösung in  $\frac{LP}{PH}$  (Line Pairs per Picture Height = Linienpaare pro Bildhöhe) an einer Stelle des Siemenssterns wird bei allen Verfahren mittels folgender Gleichung bestimmt.

$$res = \frac{N_y}{g} = \frac{N_p \cdot N_y}{2\pi r_{Pixel}} \quad (4.5)$$

$g = \frac{2\pi r_{Pixel}}{N_p}$  : Periodenlänge in Pixel

$res$  : Auflösung in  $\frac{LP}{PH}$

$N_p$  : Anzahl der Perioden des Siemenssterns

$N_y$  : Gesamtbildhöhe in Pixel

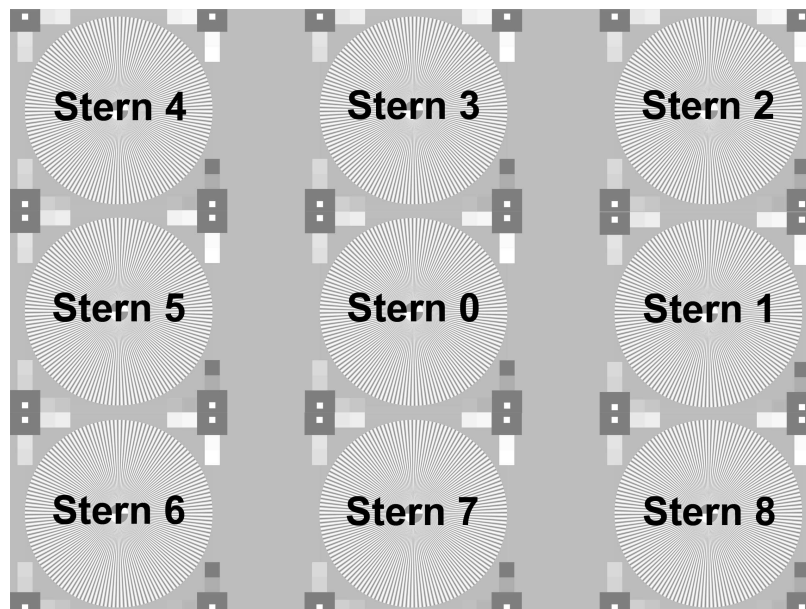
$r_{Pixel}$  : Radius des Sterns bzw. Abstand des Punktes zur Mitte in Pixel

In dieser Arbeit wurde durchgehend die Einheit Linienpaare pro Bildhöhe (LP/PH) für die Auflösung verwendet. Ein Linienpaar bezeichnet hier eine schwarze und eine weiße Linie. Diese Angabe wird auf die Höhe eines kompletten Bildes in Pixel bezogen, da aufgrund unterschiedlicher Chipgrößen eine Vergleichbarkeit der Auflösung bei einer Angabe pro Millimeter nicht gewährleistet ist.

### 4.2.5 Ausgabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung werden in einer Textdatei ausgegeben. Sie wird in der Form „DateinameDatum.txt“ gespeichert. „Dateiname“ bezeichnet den Namen der ersten auszuwertenden Bilddatei. Das Datum wird dann beispielsweise in der Form „13-Jun-2003“ angehängt.

Die Textdatei ist so formatiert, dass in der ersten Zeile das zur Auswertung verwendete Verfahren genannt wird gefolgt von den „Zeilen pro Auswertung“. Dies bezeichnet die für die Auswertung eines kompletten Siemenssterns genutzten Zeilen einer Datei. Es folgt nun die Nummer des Bildes und die Nummer des Siemenssterns. Die Nummerierung der Sterne kann Abbildung 4.5 entnommen werden. Vor der endgültigen



**Abbildung 4.5:** Nummerierung der Siemenssterne auf dem Testchart

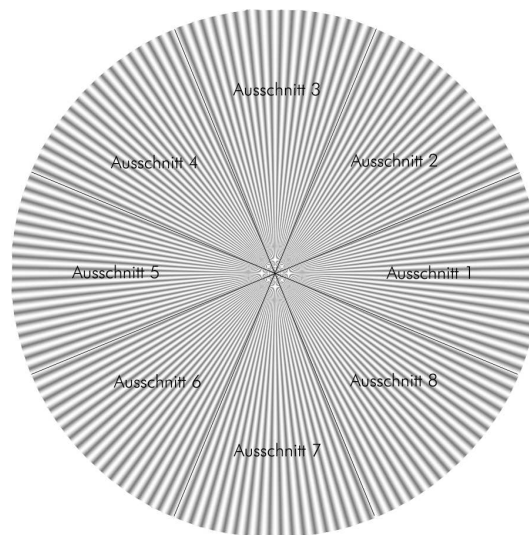
Eintragung der Messwerte werden die benötigten Spalten überschrieben mit der Nummer des Segments, sowie der Auflösung und der Nyquist-Grenze. Der Wert für die Nyquist-Grenze wird nur in der obersten Zeile jeder Auswertung aufgeführt, die folgenden Zeilen werden auf Null gesetzt.

Ein Beispiel für eine solche Textdatei zeigt Tabelle 4.1.

Auflösung	Segment 1	Segment 2	Segment 3	...	Segment 8	Nyquist-Grenze
1365.333333	0.020663	0.020270	0.011148	...	0.026638	1024.000000
1326.740030	0.010922	0.017448	0.006589	...	0.019799	0.000000
1290.268552	0.012416	0.017980	0.006293	...	0.018875	0.000000
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
151.713384	0.953086	0.928605	0.940358	...	0.939326	0.000000
151.224581	0.956235	0.935366	0.940829	...	0.942986	0.000000
150.738918	0.967082	0.929975	0.909278	...	0.957120	0.000000

**Tabelle 4.1:** Ausschnitt aus einer Textdatei

Die Nummerierung der Segmente beziehungsweise Ausschnitte kann Abbildung 4.6 entnommen werden. Zur visuellen Kontrolle der Ergebnisse wird ferner ein Bild des



**Abbildung 4.6:** Aufteilung der Ausschnitte/ Segmente des Siemenssterns

mittleren Siemenssterns der ersten Aufnahme als tif-Datei abgespeichert, in dem die Nyquist-Grenze eingezeichnet ist.

## 4.3 Auswertungsverfahren

### 4.3.1 Kontrastberechnung mit Hilfe der Fouriertransformation

Das hier verwendete Prinzip der Kontrastberechnung mit Hilfe der Fouriertransformation wurde bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

Zur Berechnung der diskreten Fouriertransformation wurde in dieser Arbeit auf die in Matlab existierende Funktion  $Z = fft(z)$  zurückgegriffen. Für Vektoren der Länge  $N$  wird die Fouriertransformation dann durch

$$Z(k) = \sum_{j=1}^N z(j) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (4.6)$$

$$\omega_N = e^{-\frac{2\pi i}{N}}$$

berechnet. [MA2]

Die Variable  $z$  bezeichnet hier den Grauwertverlauf über einen Radius  $r$  zum Mittelpunkt  $M(y_M, x_M)$ . Dieser lässt sich aus dem Rechteckgitter der Bildmatrix ermitteln, indem zu einem gegebenen Radius die Koordinaten des Punktes  $I(y, x)$  durch

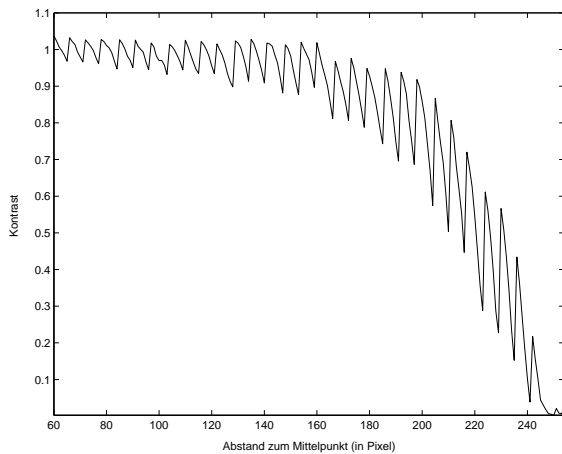
$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos(\alpha) + x_M \\ y &= y_M - r \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (4.7)$$

berechnet werden. Die Winkelwerte beginnen bei  $\alpha = 0$  und erhöhen sich um jeweils  $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{2\pi r} = \frac{1}{r}$  bis alle Pixel für einen Radius mit dem Umfang  $U = 2\pi r$  bestimmt sind. Die Funktion „round“ rundet die zumeist nicht ganzzahligen Werte für  $x$  und  $y$  nun auf die nächstliegenden ganzzahligen Bildpunktkoordinaten. Aus diesen Helligkeitswerten über einen Radius wird das gewünschte Segment des Siemenssterns (s. Abb. 4.6) ausgeschnitten und fouriertransformiert.

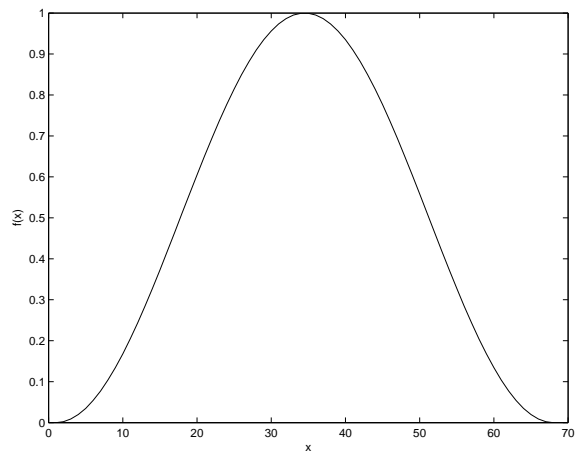
Es zeigte sich nach den ersten Tests, dass an dem grundlegenden Prinzip zur Kontrastberechnung durch die Fouriertransformation in der Praxis noch einige Verbesserungen vorzunehmen waren.

Die ersten Ergebnisse der berechneten Modulationskurve lieferten eine stark schwankende Funktion (s. Abb. 4.7). Aufgrund der Annahme, dass nicht in jedem Segment über den Umfang eines Radius' eine ganzzahlige Anzahl von Perioden ausgewertet



**Abbildung 4.7:**

Modulationskurve der ersten Tests

**Abbildung 4.8:** Hann-Fenster

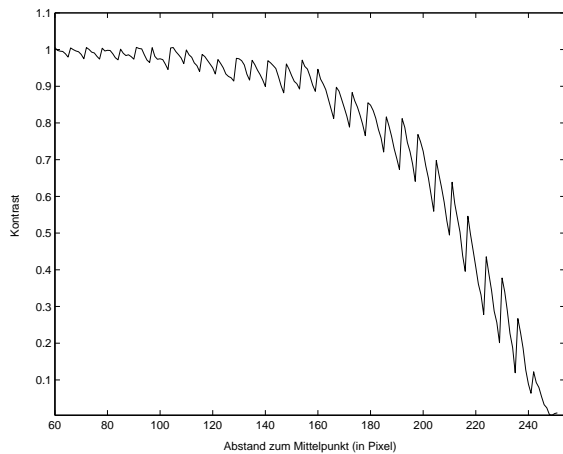
wird, wurde jeder Ausschnitt mit einem Hann-Fenster (s. Abb. 4.8) multipliziert. Es berechnet sich wie folgt.

$$f_{\cos}(x) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{T}\right) \right) \quad (4.8)$$

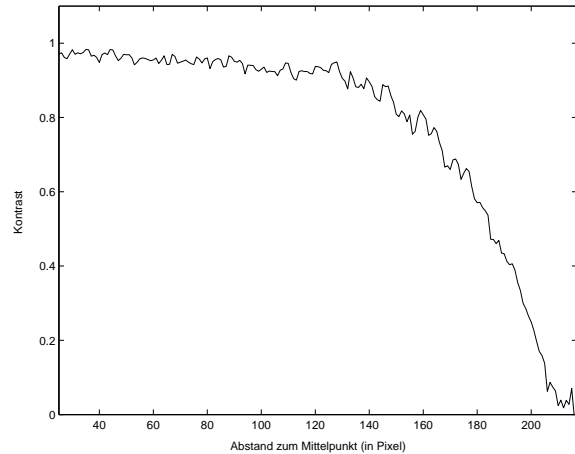
$T$  : Anzahl der Perioden, hier: z.B.  $\frac{144}{8} = 18$

„Die Verwendung des Hann-Fensters bietet (...) die Möglichkeit, relevante Frequenzinformationen deutlicher herauszuheben.“ [KLI] In diesem Fall soll verhindert werden, dass Werte, die außerhalb einer bestimmten ganzzahligen Periodenzahl liegen, die Berechnung der Fouriertransformierten beeinflussen. Die genaue Periodenzahl wird aus dem Produkt der Gesamtzahl der Perioden des Siemenssterns (hier: 144) und der Größe der Sektoren (hier z.B.  $\frac{1}{8}$ ) berechnet.

Mit Hilfe des Hann-Fensters konnte die Kurve zwar verbessert werden, aber sie war dennoch nicht optimal (s. Abb. 4.9). Schließlich wurde festgestellt, dass das Maximum der ersten Harmonischen nicht zwangsläufig an der in der Matrix vermuteten Stelle lag, sondern durch die ungenaue Periodenzahl leicht daneben. Angenommen wurde bislang, dass es sich an jener Stelle der ermittelten Matrix befand, welcher der Periodenzahl eines Segments entsprach, bei 18 Perioden also an Position (= x-Koordinate) 18. Nun lag sie jedoch leicht verschoben zum Beispiel bei 18,2. Da aber aufgrund von diskreten Werten diese Koordinate in der berechneten Matrix nicht existiert, wird zunächst



**Abbildung 4.9:** Modulation nach Anwendung des Hann-Fensters



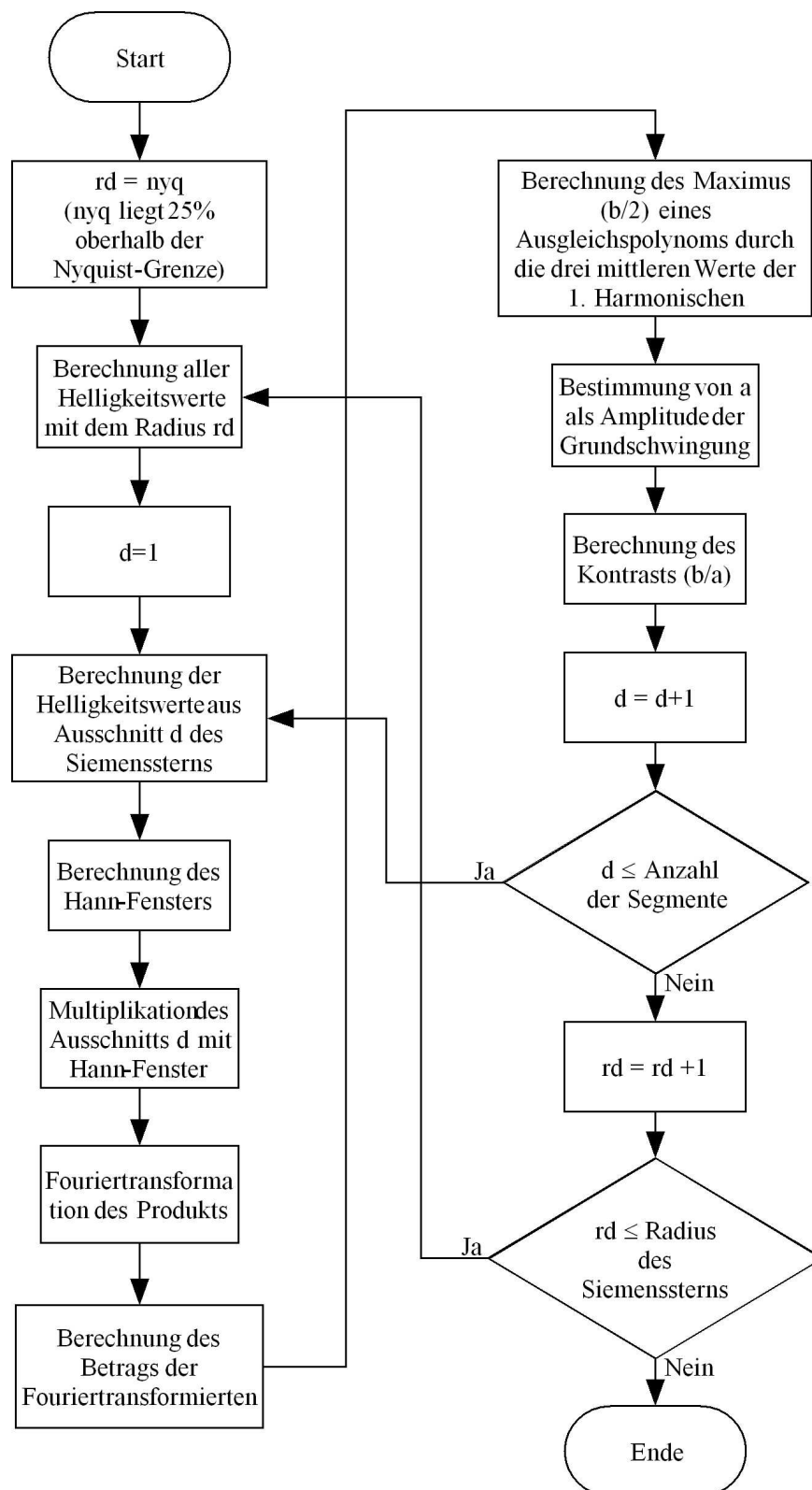
**Abbildung 4.10:** Modulation nach Berechnung der exakten Harmonischen

das Maximum jener Stelle und seinen Nachbarwerten bestimmt, an der die erste Harmonische vermutet wird. Über eine Näherung mit einem Polynom 2. Grades durch dieses Maximum und seinen beiden Nachbarn erfolgt die exakte Berechnung des Maximalwerts der ersten Harmonischen. Für diese Anpassung ist ein Polynom 2. Grades ausreichend, da eine Näherung mit der Fouriertransformierten der Rechteckfunktion, der sinc-Funktion, keine genaueren Ergebnisse liefert. (Mündliche Mitteilung Prof. Dr. Bruno Klingen, 22.01.2003) Das Maximum des Polynoms kann nun für die Berechnung des Kontrastes verwendet werden. Zusammen mit dem Hann-Fenster ergibt sich daraus ein wesentlich glatterer Modulationsverlauf als zuvor (s. Abb. 4.10).

Der Ablauf des Programms zur Kontrastberechnung mit Hilfe der Fouriertransformation ist in Abb. 4.11 dargestellt.

### 4.3.2 Kontrastberechnung mit Hilfe des Phasenshiftverfahrens

Um das in Kapitel 2.3.2 beschriebene Phasenshiftverfahren korrekt anwenden zu können, müssen in der Regel vier Aufnahmen gemacht werden, bei denen das abzubildende harmonische Signal um jeweils  $\frac{\pi}{2}$  zum vorherigen phasenverschoben wird. Bei digitalen Kameras ist es jedoch schwierig aufeinanderfolgende Bilder aufzunehmen, die pixelgenau übereinander liegen. Da ein Pixelversatz von zum Beispiel einem Pixel aber für



**Abbildung 4.11:** Kontrastberechnung mit Hilfe der Fouriertransformation

hohe Frequenzen schon einen großen Fehler verursacht, wurde für die Auswertung mit dem Phasenshiftverfahren nur ein Bild fotografiert und die phasenverschobenen Folgebilder aus diesem errechnet.

Es wurden verschiedene Möglichkeiten der Auswertung für dieses Verfahren getestet, die in diesem Abschnitt beschrieben werden.

Zunächst erfolgte die Auswertung so, dass zu jedem Punkt  $I(y,x)$  in der Bildmatrix die Position zum Mittelpunkt berechnet wurde. Es wird demnach der Abstand  $r$  und der Winkel  $\alpha$  zur Mitte  $M(y_M, x_M)$  durch

$$r = \sqrt{(y_M - y)^2 + (x - x_M)^2} \quad (4.9)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_M - y}{x - x_M}\right) \quad (4.10)$$

(Winkelberechnung mit der Matlabfunktion  $\text{atan2}(Y,X)$ ) bestimmt. Davon ausgehend werden zunächst die Winkel  $\alpha_k$  für die um  $\frac{\pi}{2}$ ,  $\pi$  und  $\frac{3}{2}\pi$  phasenverschobenen Punkte ermittelt, mit deren Hilfe man die Koordinaten der Punkte  $I_k(y_k, x_k)$ , die den gleichen Abstand zur Mitte wie das Ausgangspixel besitzen, errechnet. Die Berechnung erfolgt durch

$$\begin{aligned} y_k &= y_M - r \cdot \sin(\alpha_k) \\ x_k &= r \cdot \cos(\alpha_k) + x_M \end{aligned} \quad (4.11)$$

mit

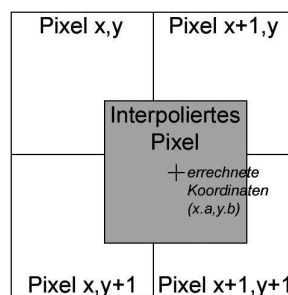
$$\alpha_k = \alpha + \frac{\pi}{2} \cdot (k - 1) \cdot p \quad (4.12)$$

$p$  : Perioden des Siemenssterns

$k = 2, \dots, 4$

Es kommt jedoch oft vor, dass diese Koordinaten nicht ganzzahlig sind und somit nicht auf ein im Bild vorhandenes Pixel treffen, sondern zwischen diesen liegen. In diesem ersten Verfahren wurde daher auf das nächstliegende Pixel mit der Funktion „round“ „kaufmännisch“ gerundet und dieser Helligkeitswert für die Berechnung hinzugezogen. Wenn man so für jedes Pixel im Bild die Helligkeitswerte für  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  und  $I_4$  ermittelt hat, kann man mit Hilfe der Gleichungen 2.20 bis 2.22 beziehungsweise 2.23 den Kontrast und mit Gleichung 2.19 die Phase bestimmen.

Um Probleme und Fehler durch die eben beschriebene Rundung auf ganzzahlige Koordinaten zu vermeiden, wurde dann versucht, durch Interpolation der existierenden Bildwerte den Helligkeitswert an der berechneten Koordinatenposition zu bestimmen. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zum einen kann im obigen Verfahren von einem bereits im Bild existierenden Pixel ausgegangen und die drei phasenverschobenen Pixel entsprechend berechnet werden. Nun erfolgt die Ermittlung der Helligkeitswerte der exakten Koordinaten durch Interpolation über die vier benachbarten Pixel (s. Abb. 4.12). Dabei werden die Helligkeitswerte anteilig ihrer Fläche im errechneten



**Abbildung 4.12:** Interpolation über vier benachbarte Pixel

Pixel gewichtet. Es ergibt sich dann der neue Helligkeitswert gemäß

$$I_{neu} = (1 - a) \cdot (1 - b) \cdot I(y, x) + a \cdot (1 - b) \cdot I(y + 1, x) + \dots \\ + (1 - a) \cdot b \cdot I(y, x + 1) + a \cdot b \cdot I(y + 1, x + 1). \quad (4.13)$$

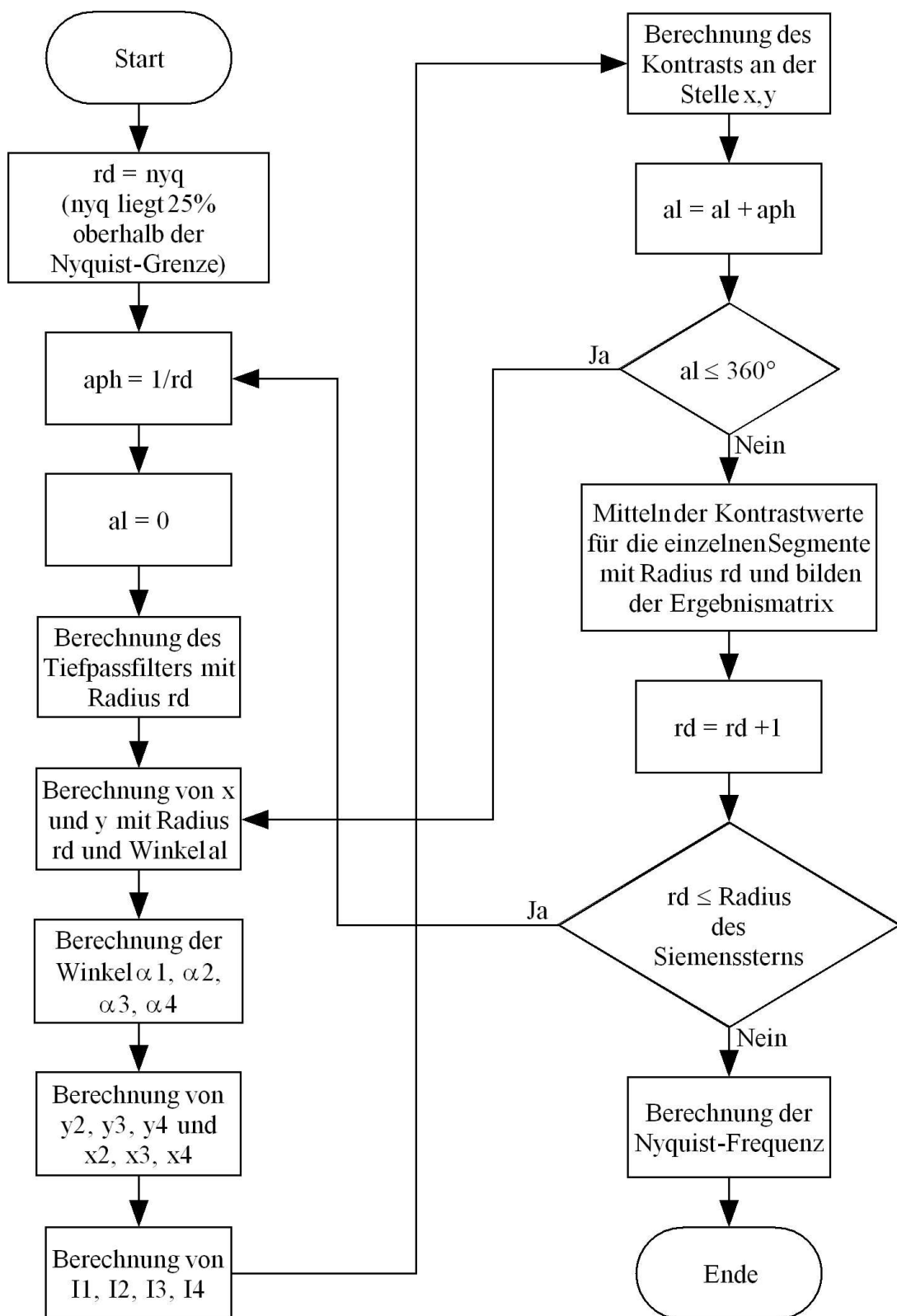
$a$  : Nachkommastelle der exakten  $y$ -Koordinate

$b$  : Nachkommastelle der exakten  $x$ -Koordinate

$I(y, x)$  : Helligkeit an dem gegen Null gerundeten Pixelwert  $y, x$

Aus den so berechneten Werten für  $I_2$ ,  $I_3$  und  $I_4$  sowie dem Ausgangswert für  $I_1$  kann man nun wie oben Kontrast und Phase berechnen.

Eine weitere Möglichkeit ist es, auch  $I_1$  durch Interpolation zu bestimmen. Dabei wird von einer Entfernung  $r$  zum Mittelpunkt  $M(y_M, x_M)$  ausgegangen, an dem für jedes Pixel dieses Umfangs der Kontrast und die Phase bestimmt wird. Die Koordinaten zum Punkt  $I_1$  lassen sich mit Gleichung 4.7 errechnen. Die Berechnungen aller übrigen Koordinaten sowie Winkel zu  $I_k(y_k, x_k)$  sowie der interpolierten Helligkeitswerte, des



**Abbildung 4.13:** Kontrastberechnung mit Hilfe des Phasenshiftverfahrens

Kontrasts und der Phase erfolgen entsprechend den obigen Erläuterungen.

Ein Problem der Interpolation ist, dass sie wie ein Tiefpassfilter wirkt. Hier wird wie bei der Abtastung (s. Kap. 2.2) die mittlere Helligkeit einer Fläche beziehungsweise in diesem Fall von vier Flächen bestimmt, was einer Integration entspricht. Auch dieser Tiefpassfilter kann durch eine sinc-Funktion, die in Gleichung 2.11 beschrieben ist, dargestellt werden. Bei der Berechnung des Kontrasts mit Hilfe des Phasenshiftalgorithmus' besteht daher die Möglichkeit, den bekannten, durch Anwendung der Interpolation entstandenen Tiefpass, wieder heraus zu rechnen.

Allen Verfahren gemein ist die Berechnung des Kontrasts über einzelne Ausschnitte des Siemenssterns. So wird jeweils nach Berechnung der einzelnen Kontrastwerte über den Intensitätsverlauf eines Radius'  $r$  der Mittelwert über die gewünschte Segmentgröße (z.B.  $\frac{1}{8}$  des Sterns) bestimmt. Dieser Wert kann dann in Abhängigkeit von der Auflösung an der jeweiligen Stelle dargestellt werden.

Bislang wurde lediglich der Kontrast über dieses Verfahren berechnet. Es ist zwar möglich, wie oben beschrieben, ebenfalls die Phase zu ermitteln, dies wurde jedoch bisher nicht genutzt. Das ist auch am Flussdiagramm in Abbildung 4.13 zu erkennen. Es zeigt das Auswertungsprogramm für das Phasenshiftverfahren mit Interpolation und heraus gerechnetem Tiefpassfilter.

### 4.3.3 Kontrastberechnung mit Hilfe des Histogramms

Für die Berechnung des Histogramms wird jedes Pixel einbezogen, das den gewünschten Radius berührt. Dazu werden zunächst bei  $\alpha = 0$  Grad die Koordinaten  $x$  und  $y$  des Punktes  $I_0$  bestimmt und auf das nächstgelegene ganzzahlige Pixel gerundet, das den Radius berührt. Dann wird  $\alpha$  um  $\frac{1}{4}$  des Winkels, der rechnerisch zwischen zwei Pixeln eines Radius liegt, verschoben und damit  $I_1(y, x)$  ermittelt. Um zu verhindern, dass es sich bei den nächsten Koordinaten nicht um die gleichen wie die vorherigen handelt, werden die neu berechneten stets mit den zuletzt für die Histogrammberechnung benutzten  $x$ - und  $y$ -Werten verglichen und nur bei Ungleichheit von mindestens einem der beiden Koordinaten zur Berechnung hinzugezogen. Sind alle Werte, die einen Radius berühren, ermittelt, berechnet sich das Histogramm für jeden Ausschnitt des Siemens-

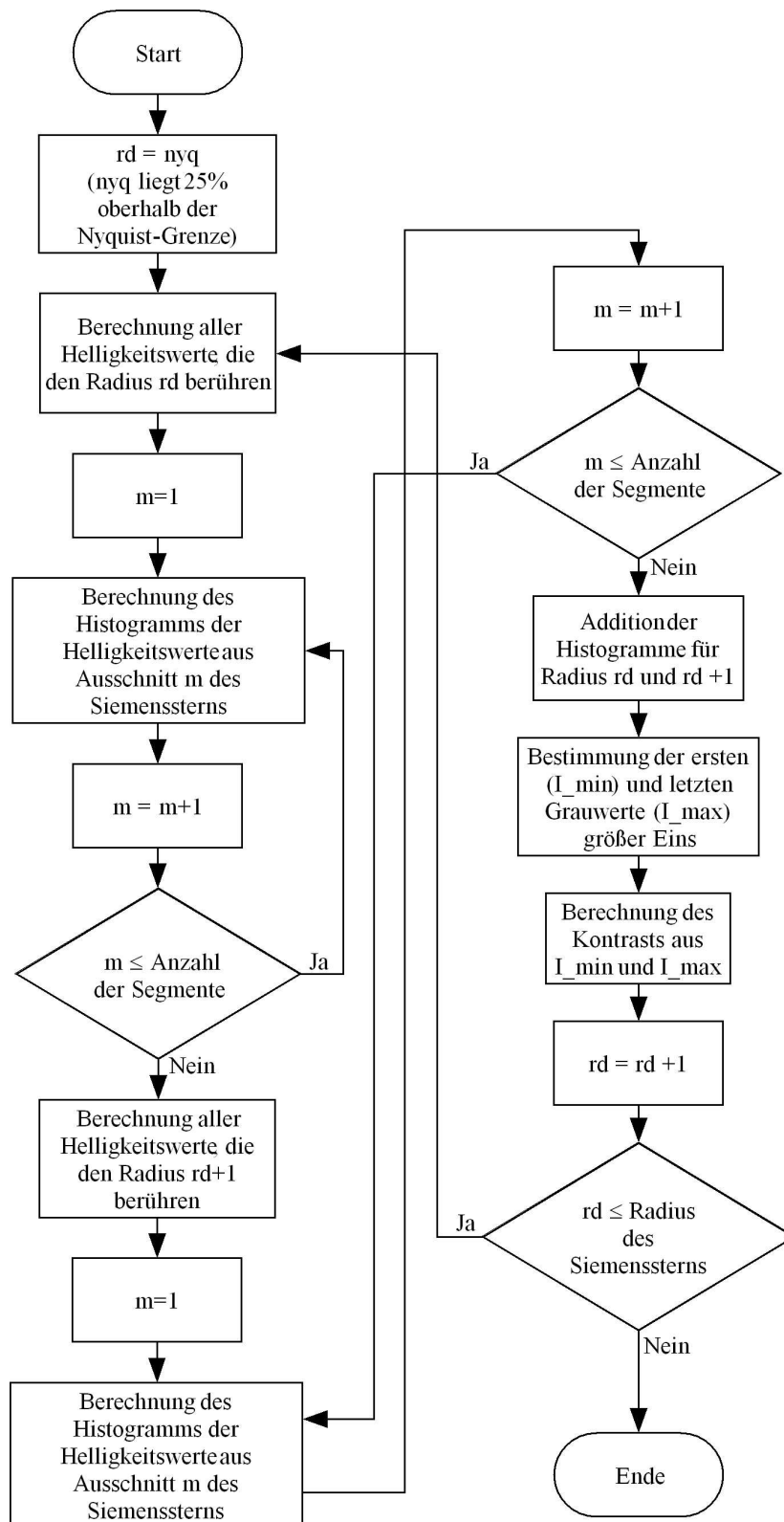


Abbildung 4.14: Kontrastberechnung mit Hilfe des Histogramms



sterns mit der Funktion „imhist“. Danach wird das gleiche für einen Radius, der um ein Pixel verschoben ist, durchgeführt. Nach Addition der Histogramme erfolgt daraus die Ermittlung des ersten und letzten Pixels, das größer Eins ist. Dieser Schwellwert wurde so gewählt, damit sich fehlerhafte Bildpunkte und „Ausreißer“ geringer auf das Ergebnis auswirken. Die Helligkeitswerte der berechneten Grenzen entsprechen  $I_{max}$  und  $I_{min}$ . Nach Gleichung 2.2 kann dann der Kontrast bestimmt werden. Das Flussdiagramm in Abbildung 4.14 zeigt eine Übersicht über die Berechnung des Kontrasts mit Hilfe des Histogramms.

#### 4.3.4 Kontrastberechnung mit Hilfe des Fit-Verfahrens

Aufgrund der Tatsache, dass das Fit-Verfahren kurzfristig in diese Arbeit aufgenommen wurde, soll der Entwickler dieser Methode, Herr. Prof. Dr. Bruno Klingen, nun selbst zu Wort kommen. Die folgenden Erläuterungen zum programmtechnischen Ablauf hat er mir freundlicherweise für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

Die Kontrastberechnung nach der Approximations-Methode der kleinsten Quadrate (curve-fitting) wird in zwei Schritten durchgeführt.

„1. Ermittlung der Koordinaten der dem Kreisbogen benachbarten Pixel auf dem rechtwinkligen Punktraster: Algorithmus für den sog. „digitalen Kreis“ zum Radius R.

Es wird davon ausgegangen, dass die Pixelkoordinaten in dem Punktraster durch ganzzahlige Werte für den vertikalen beziehungsweise horizontalen Pixelverlauf angegeben sind:  $P(i,j)$ . (...) Zur Unterscheidung sollen Punkte auf dem exakten Kreisbogen mit  $P(y,x)$  und Punkte auf dem digitalen Kreis mit  $Q(i,j)$  bezeichnet werden.

Zu dem bekannten Mittelpunkt des Kreises (Mittelpunkt des Siemenssterns)  $M(y_M, x_M)$  und dem Radius R (mit möglicherweise nicht ganzzahligen Werten  $y_M$ ,  $x_M$  und R) soll der Algorithmus des digitalen Kreises für den ersten Quadranten beschrieben werden. Für die restlichen Quadranten ist er entsprechend anzupassen.

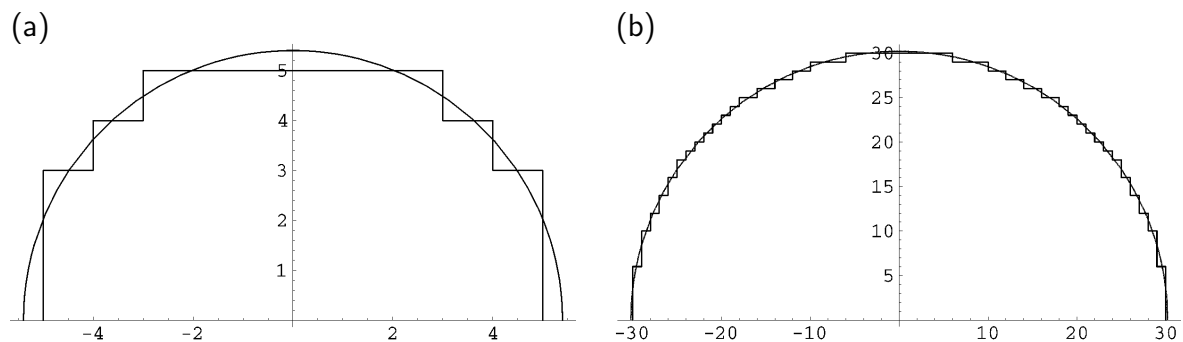
Ausgehend von dem Startpunkt  $P(y_M - R, x_M)$  (oberster Punkt des Kreises) auf dem Kreisbogen wird zunächst der erste Näherungspunkt  $Q_0(i_0, j_0)$  durch die round-Funktion berechnet:  $i_0 = \text{round}(y_M - R)$ ,  $j_0 = \text{round}(x_M)$ . Der Algorithmus geht dann von einem Punkt  $Q_k(i_k, j_k)$  ( $k \geq 0$ ) auf dem digitalen Kreis zu dem Nachfolger

$Q_{k+1}(i_{k+1}, j_{k+1})$  durch die beiden folgenden Schritte über:

- Festlegung der beiden möglichen Nachfolger  $S(i_k, j_k + 1)$  (horizontal nach rechts) und  $T(i_k + 1, j_k)$  (vertikal nach unten).
- Nachfolger  $Q_{k+1}$  unter diesen beiden Punkten wird derjenige mit dem geringsten Abstand zu dem exakten Kreisbogen.

Das Ende des Algorithmus' für den ersten Quadranten ist erreicht, wenn für einen Punkt  $Q_k(i_k, j_k)$  gilt:  $i_k > y_M$ . Falls nur die Punkte auf einem Teilsektor des Kreisbogens im ersten Quadranten benötigt werden, lässt sich mit Hilfe der Matlabfunktion `atan2(Y,X)` überprüfen, ob der Grenzwinkel überschritten ist.

Ergebnisse des Algorithmus' zum digitalen Kreis sind für einen „kleinen“ Radius ( $R = 5.4$ ) in der Abbildung 4.15a und für einen größeren Radius ( $R = 30.2$ ) in der Abbildung 4.15b wiedergegeben.



**Abbildung 4.15:** Digitaler Kreis für einen „kleinen“ (a) und einen größeren Radius (b)

## 2. Approximation durch die Funktion 2.24

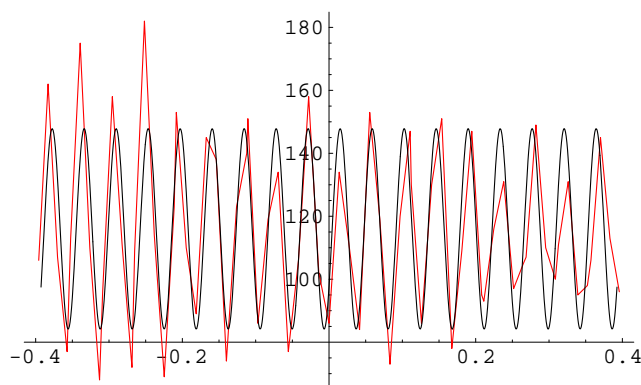
Um den Grauwertverlauf des Siemenssterns auf dem Bogen durch die Funktion 2.24 zu approximieren, werden die Grauwerte der Pixel mit den Koordinaten  $Q_k(i_k, j_k)$  auf dem digitalen Kreis in Abhängigkeit von dem Winkel  $\varphi_k$  des Punktes  $Q_k$  benötigt (hierbei ist es unerheblich, welche Orientierung des Winkelverlaufs gewählt und mit welcher Richtung für  $\varphi = 0$  gearbeitet wird). Die Winkelberechnung erfolgt (mit der

Matlabfunktion  $\text{atan2}(Y,X)$  durch

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) = \text{atan2}(x,y) = \text{atan2}((j_k - x_M), (y_M - i_k)).$$

(Bei dieser Reihenfolge der Argumente zu  $\text{atan2}$  liegt der Winkel  $\varphi = 0$  auf der senkrecht nach oben gerichteten  $y$ -Achse; Punkte links von der  $y$ -Achse haben negative und rechts von der  $y$ -Achse positive Werte. Diese Wahl der Winkel entspricht der Vorstellung eines senkrecht nach oben und symmetrisch zur  $y$ -Achse liegenden Kreissektors.) Bezeichnet man mit  $gr_k$  den Grauwert zu dem Punkt  $Q_k$ , dann ist zu den Zahlenpaaren  $(\varphi_k, gr_k)$  das Approximationsverfahren für den Ansatz 2.24 durchzuführen. Da in 2.24 die Phasenlage des Grauwertverlaufs zu einem bestimmten Winkel nicht bekannt ist, wird anstelle von 2.24 der Approximationsansatz [aus Gleichung 2.26] gewählt. Mit den Ergebniswerten  $a, b_1, b_2$  der Approximation erhält man die gesuchte Amplitude  $b$  in 2.24 durch [Gleichung 2.27]“ [KLS].

Ein Beispiel einer solchen Näherung zeigt Abbildung 4.16. Dabei stellt der rote Graph die linear verbundenen Grauwerte eines Kreisbogens, und die schwarze Kurve das Ergebnis der Approximation dar.



**Abbildung 4.16:**

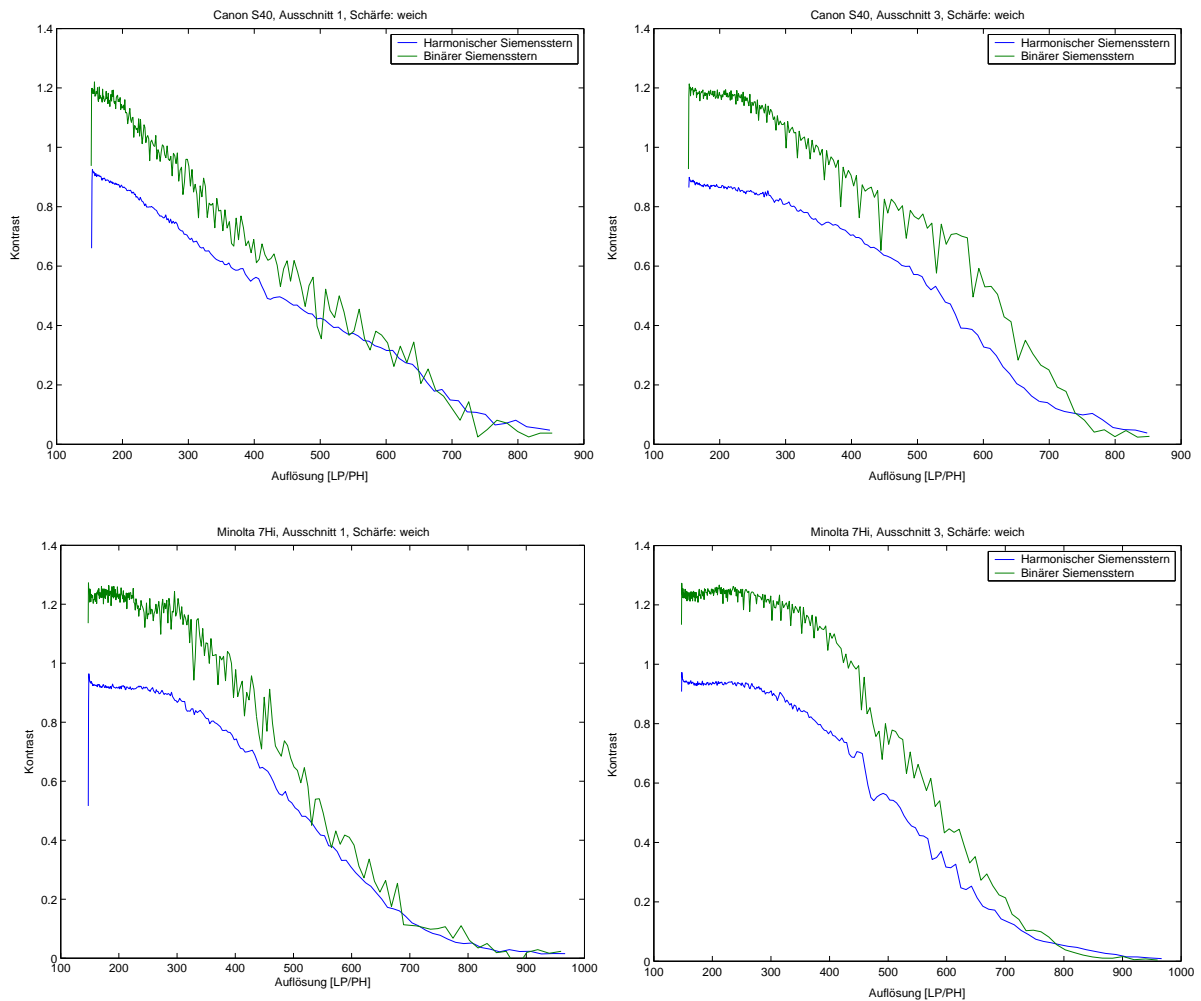
Vergleich zwischen Grauwerten des Kreisbogens und Approximationsergebnis

# 5 Ergebnisanalyse

## 5.1 Vergleich der Testverfahren

In den folgenden Abschnitten werden die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Verfahren zur Auflösungs-messung verglichen. Zunächst sind die Vor- und Nachteile der möglichen Varianten des Testcharts und danach die der Auswertungsverfahren beschrieben.

Der zeitliche Ablauf der Arbeit hat ebenfalls Einfluss auf die Wahl der Verfahren genommen. So wurde begonnen, einen binären Siemensstern mit Hilfe der Fouriertransformation auszuwerten. Da dieses Verfahren jedoch nicht vollkommen zufriedenstellende Ergebnisse unter anderem aufgrund der starken Kontrastschwankungen (vgl. Kap. 4.3.1) lieferte, wurde das Phasenshiftverfahren als Alternative getestet. Weil diese Methode allerdings nur bei Eingabe von harmonischen Signalen funktioniert, musste hierfür zu einem harmonischen Siemensstern übergegangen werden. Auf Basis eines Vergleichs der beiden Verfahren (s. Abb. 5.1) erfolgte eine Entscheidung. Das Phasenshiftverfahren und damit auch der harmonische Siemensstern wurde dem anderen Verfahren vorgezogen, da es schlüssigere und glattere Kurven lieferte. Zunächst erfolgte die Ermittlung der benötigten Helligkeitswerte durch Rundung der berechneten Koordinaten der Phasenshiftwerte. Da dies zu einer fehlerhaften Kontrastberechnung führen kann, wurde eine Verbesserung dieser Berechnung vorgenommen, welche die Helligkeitswerte der genauen Pixelkoordinaten interpoliert (vgl. Kap. 4.3.2). Nach weiteren Überlegungen und einer Simulation des Verfahrens zeigten sich jedoch einige Schwächen des verwendeten Online-Phasenshifts. Das führte zu ersten Experimenten mit der Kontrastberechnung über das Histogramm. Kurzfristig erfolgte ferner die Auf-



**Abbildung 5.1:**

Vergleich zwischen Fouriertransformation mit binärem Siemensstern und Phasenshiftverfahren mit harmonischem Siemensstern

nahme des Fit-Verfahrens in diese Arbeit.

Auf dieser Basis wird nun abschließend ein Vergleich aller vorgestellten Verfahren und der zwei möglichen Testmuster (binärer und harmonischer Siemensstern) durchgeführt, der jeweils die Vor- und Nachteile verdeutlichen und die Ergebnisse veranschaulichen soll. Dabei wurde bislang keine Normierung der Ergebnisse vorgenommen. Diese ist für einen Vergleich der Verfahren untereinander nicht zwingend notwendig, sollte aber, wenn die exakten Werte der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) benötigt werden, noch durchgeführt werden.

Eine Normierung beziehungsweise die exakte Berechnung der MTF erfolgt durch Di-

vision des Eingangs- durch das Ausgangssignal (vgl. Gleichung 2.3). Um das wirkliche Eingangssignal zu erhalten, besteht die Möglichkeit, ein schwarzes ( $I_{max}$ ) und ein weißes Feld ( $I_{min}$ ) mit einem Leuchtdichtemessgerät auszumessen und den Kontrast nach Gleichung 2.2 zu berechnen. Die Felder sollten sich dabei an dem Ort befinden, an dem die eigentlichen Tests durchgeführt werden, und die Beleuchtung sollte mit derjenigen des Testcharts übereinstimmen. Möglich ist hier beispielsweise die Nutzung eines schwarzen und weißen Feldes der auf dem Testchart montierten Graufelder. Für die Ermittlung des exakten Kontrasts ist genaugenommen die Modulation des Eingangssignals für alle Ortsfrequenzen des Siemenssterns zu bestimmen. Dazu müssen die Helligkeitswerte für den gesamten Stern gemessen werden. Dies stellt sich jedoch vor allem bei hohen Frequenzen als schwierig heraus, da die Größe der einzelnen Graustufen zur Sternmitte immer geringer wird, sodass sich die Messung mit einem herkömmlichen Densitometer erschwert. Die genaue Modulation wäre jedoch ermittelt, wenn für jede Ortsfrequenz das Ausgangssignal durch das dazugehörige Eingangssignal nach Gleichung 2.3 dividiert wird. Bei den folgenden Messungen wird ein Eingangskontrast von Eins angenommen, sodass dieser Quotient gleich dem Ausgangssignal ist.

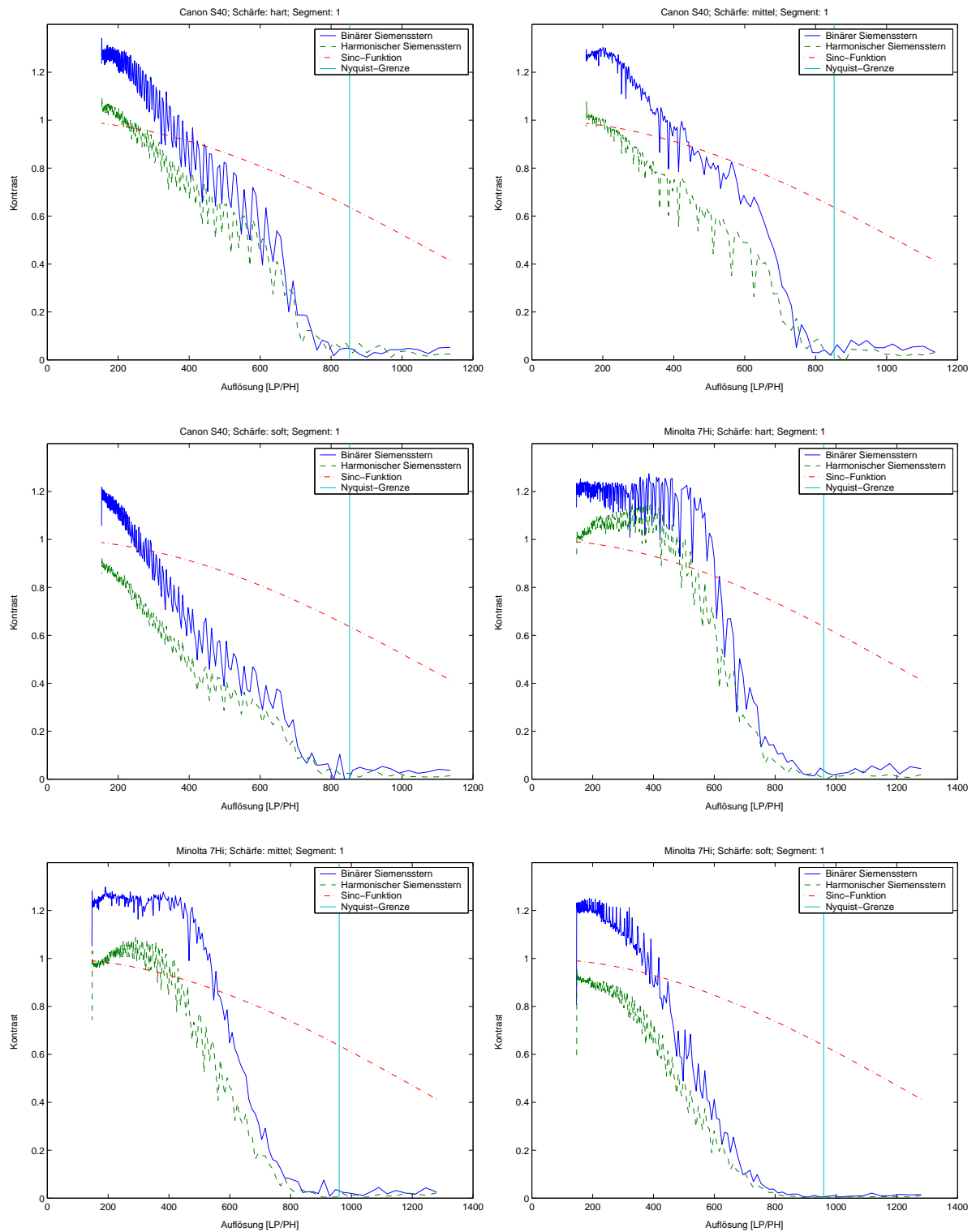
In den Grafiken ist die sinc-Funktion aus Gleichung 2.11 als maximaler Kontrastwert angegeben. Sie stellt jedoch nicht die optimale MTF einer Digitalkamera dar, sondern lediglich die theoretische Übertragungsfunktion der Kameraabtastung (s. Kap. 2.2.1). Sie beschreibt aber insofern den maximalen Kontrast an den jeweiligen Ortsfrequenzen, als schon allein durch die Integration bei der Abtastung eine Kontrastminderung in Form der sinc-Funktion bei jeder Kamera eintritt. Eine höhere Modulation ist demnach nicht realistisch. Sie sollte jedoch nicht als optimale Übertragungsfunktion angesehen werden, da ein solches System oberhalb der Nyquist-Grenze eine hohe Anfälligkeit zur Moirébildung besäße. Dies liegt daran, dass bei Frequenzen mit weniger als 2 Abtastpunkten pro Periode immer noch ein hoher Kontrast erreicht würde. Hieraus resultieren jedoch in diesem Frequenzbereich, wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, Abtastfehler, die sich in Aliasfrequenzen beziehungsweise Moirémustern widerspiegeln.

In allen folgenden Abbildungen ist jeweils der Kameratyp, mit dem das ausgewertete Bild aufgenommen wurde, mit einer Kurzbezeichnung angegeben (Canon EOS 10D: Canon D10, Canon Powershot S40: Canon S40, Minolta Dimage 7Hi: Minolta 7Hi).

### 5.1.1 Binärer und harmonischer Siemensstern

Der Anlass, vom binären auf den harmonischen Siemensstern überzugehen, ergab sich, wie oben erläutert, durch die Anwendung des Phasenshiftverfahrens, für das ein harmonisches Eingangssignal Voraussetzung ist. In diesem Abschnitt werden die beiden Siemenssterne miteinander verglichen. Dazu wurde das Verfahren der Fouriertransformation gewählt.

Abbildung 5.2 zeigt, dass die über den binären Siemensstern bestimmte Modulationskurve bei allen Messungen oberhalb derjenigen liegt, die mittels des harmonischen Sterns ermittelt wurde. Ferner bleibt festzustellen, dass sich der Anfangskontrast dieser Kurve bei allen Schärfestufen (hart, mittel, soft) kaum verändert. Dies lässt sich damit begründen, dass es sich hier um ein nichtharmonisches Eingangssignal handelt, denn der binäre Siemensstern liefert ein Rechtecksignal als Vorlage. Wie Abbildung 2.9a zeigt, besitzt die erste Harmonische einer Rechteckschwingung eine größere Amplitude als das Originalsignal, während der Mittelwert konstant bleibt. Bei Berechnung des Kontrasts mit Hilfe der Fouriertransformation wird aber die Amplitude dieser Grundschwingung genutzt, um den Kontrast nach Gleichung 2.14 zu berechnen (vgl. Kap. 2.3.1). Daraus ergibt sich ein um einen bestimmten Faktor erhöhter Kontrast, da die Amplitude  $b$  der ersten Harmonischen größer als die der Rechteckschwingung ist, aber der Mittelwert  $a$  gleich bleibt. So kann sich auch ein Kontrast über Eins ergeben. Es ist nur theoretisch möglich den Faktor, um den die Amplitude der Grundschwingung über der des Rechtecksignals liegt, heraus zu rechnen, da in der Praxis bei zunehmenden Frequenzen die Kanten der Rechteckschwingung durch die Kamera abgeflacht werden, sodass das aufgenommene Signal immer mehr einem harmonischen Grauverlauf anstelle einer s/w-Kante entspricht. Dementsprechend läuft der theoretisch berechenbare Faktor bei hohen Frequenzen in der Mitte des Siemenssterns gegen Eins. Das erklärt auch die Tatsache, dass sich im Bereich der hohen Frequenzen die Modulationskurven von binärem und harmonischem Siemensstern annähern. Ein harmonisches Eingangssignal hat hingegen den Vorteil, dass die Amplitude der ersten Harmonischen gleich der Amplitude der ursprünglichen harmonischen Schwingung ist, wodurch der korrekte Kontrast ermittelt werden kann. Voraussetzung ist jedoch eine vorherige Linearisierung



**Abbildung 5.2:** Vergleich zwischen binärem und harmonischem Siemensstern



des Bildes, da sonst möglicherweise ein nicht harmonisches Signal vorliegt, wodurch wie bei der Rechteckfunktion eine Veränderung des Kontrasts möglich ist. Beim binären Siemensstern ist dagegen keine Linearisierung notwendig.

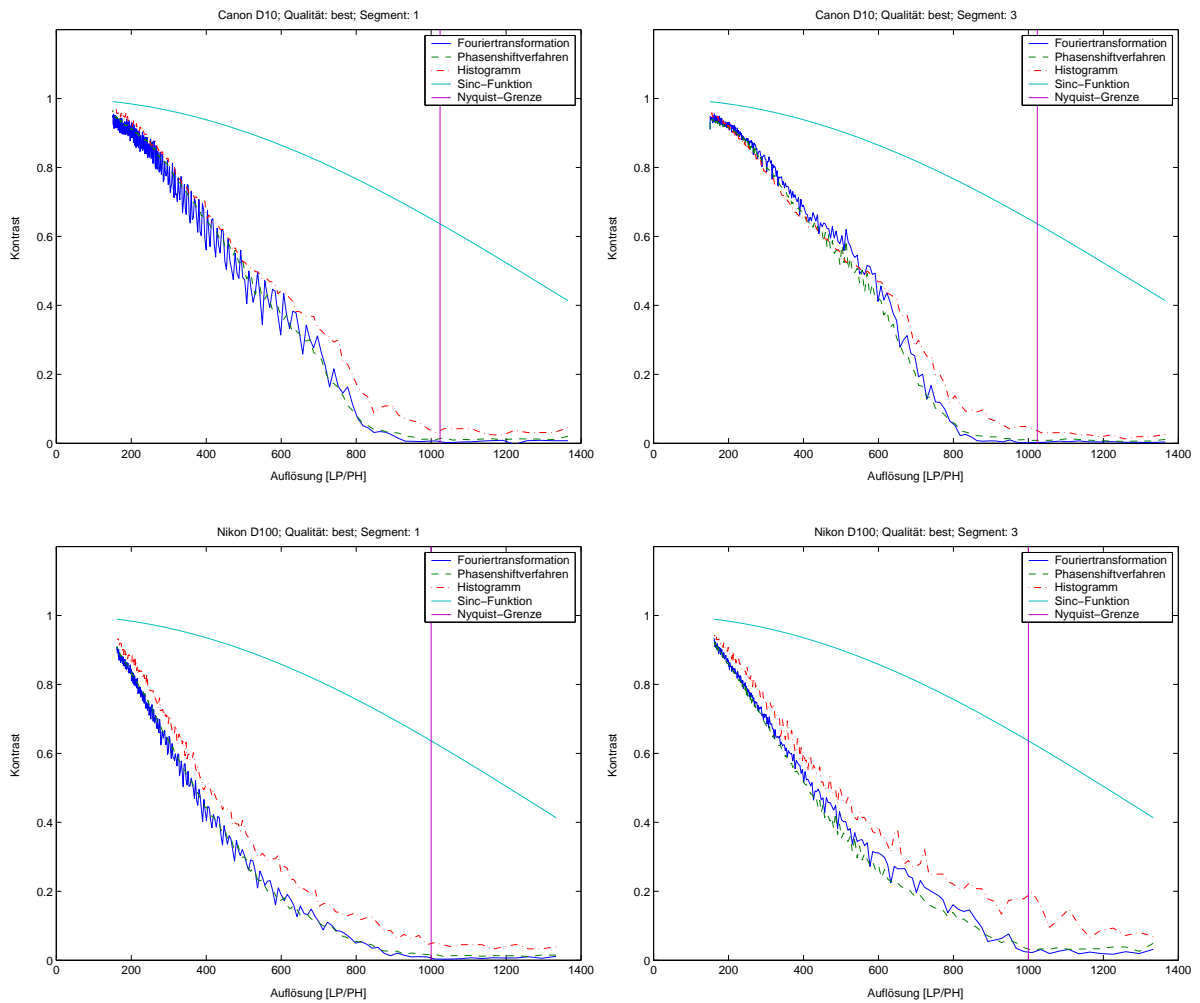
Die Vorteile des binären Siemenssterns liegen hauptsächlich in den besseren Druckmöglichkeiten. Die Vorlage kann hier sowohl als Auflicht- als auch als Durchlichttestchart hochauflösend gedruckt werden, sodass Digitalkameras mit hohem Auflösungsvermögen schon mit Sternen von geringem Durchmesser getestet werden könnten. Im Verhältnis dazu müssen die harmonischen Siemenssterne wesentlich größer hergestellt werden, um eine ausreichende Qualität zur Messung solcher digitaler Kameras zu ermöglichen.

Da der harmonische im Gegensatz zum binären Siemensstern bei der Auswertung Vorteile hat, weil die Ergebnisse durch den harmonischen Verlauf nicht verfälscht werden, werden die Auswertungsmethoden im Folgenden lediglich über diesen verglichen. Ferner ist für die Methode des Phasenshiftverfahrens ein harmonischer Siemensstern unerlässlich.

Die Probleme, die sich durch die Schwierigkeiten beim Druck des Testcharts ergeben, können zurzeit nicht behoben werden. Für Tests von hochauflösenden Kameras sollte entweder der Abstand zum Testchart oder das Testchart selbst vergrößert werden. Wie auf den Abbildungen in diesem Kapitel zu erkennen, ergibt sich durch die größere Entfernung zum Testchart, dass immer weniger niedrige Frequenzen ausgewertet werden können. So beginnen die bisherigen Auswertungen zum Beispiel erst bei ca. 150 bis 200 Linienpaaren pro Bildhöhe. Möchte man den Kontrast von niedrigeren Frequenzen errechnen, so könnte auf dem Testchart um den eigentlichen Siemensstern mit 144 Perioden noch einer mit geringerer Periodenzahl von zum Beispiel 24 abgebildet werden. So ist bei der Auswertung auch die Messung niedriger Frequenzen möglich.

### **5.1.2 Vergleich der Auswertungsmethoden**

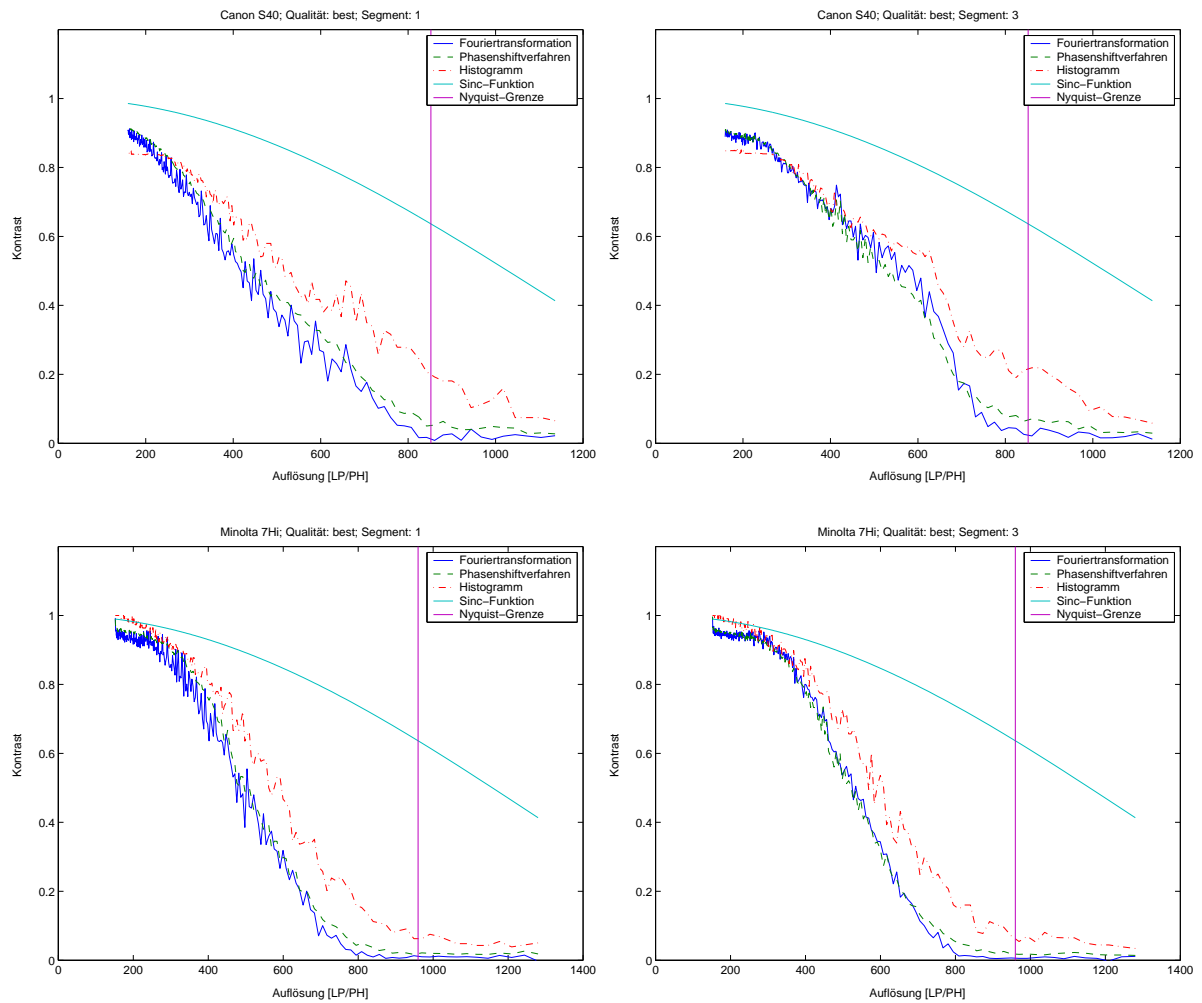
Abschließend soll in diesem Abschnitt ein Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Auswertungsmethoden vorgenommen werden. Die Durchführung eines ausführlichen Vergleichs mit dem Fit-Verfahren war aufgrund seiner kurzfristigen Aufnahme nicht mehr möglich. Ferner wird die Auswirkung von Einflussfaktoren wie Bildqualität und



**Abbildung 5.3:** Vergleich aller Auswertungsverfahren mit digitalen SLR-Kameras

Bildschärfe dargestellt. In den hier verwendeten Abbildungen werden die untersuchten Methoden zum Teil mit Abkürzungen bezeichnet. So bedeutet das Kürzel „FFT“ (Fast Fourier Transform), dass das Verfahren der Fouriertransformation verwendet wurde, und die Abkürzung „PSA“ (Phasenshiftalgorithmus), dass das Phasenshiftverfahren zur Anwendung gekommen ist. Bei den abgebildeten Messungen dieses Kapitels berechnen sich die benötigten Helligkeitswerte für den Online-Phasenshift durch Interpolation der vier benachbarten Pixel (s. Kap. 4.3.2). Die dadurch vorgenommene Tiefpassfilterung wird heraus gerechnet. Die Nummerierung der Sternsegmente orientiert sich an Abbildung 4.6.

Bei den Ergebnissen in den Abbildungen 5.3 und 5.4 fällt auf, dass Phasenshiftver-

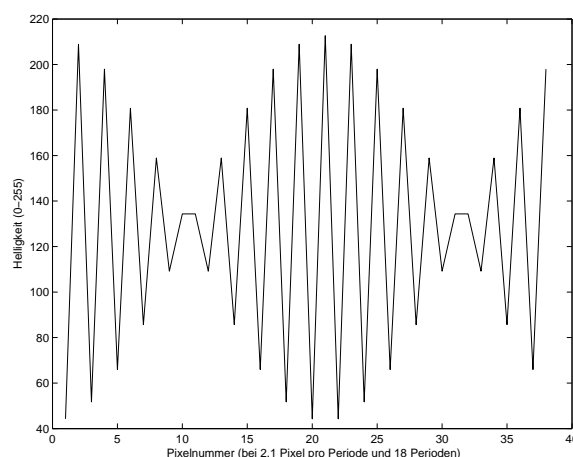


**Abbildung 5.4:** Vergleich aller Auswertungsverfahren mit digitalen Kompaktkameras

fahren und Fouriertransformation einen ähnlichen Kurvenverlauf liefern, während die über das Histogramm berechnete MTF vor allem bei hohen Frequenzen über den Werten der anderen beiden Verfahren liegt. Eine Ursache mag die Tatsache sein, dass mit Fouriertransformation und Phasenshiftalgorithmus der mittlere Kontrast einer Ortsfrequenz bestimmt wird. Es erfolgt eine Mittelung des Kontrasts, der um eine Frequenz innerhalb eines Sektors schwankt. Das Histogrammverfahren berechnet hingegen den minimalen und maximalen Helligkeitswert eines Segments des Siemenssterns und somit den Maximalkontrast einer Ortsfrequenz. Dies hat den Nachteil, dass diese Methode rauschempfindlicher als die beiden anderen ist. Auch fehlerhafte Pixel können hier Einfluss auf die Modulationsberechnung nehmen. Ein durch ein solches Pixel falsch

berechneter Kontrastwert kann aber durch die Betrachtung der kompletten MTF reguliert werden. Mit Hilfe der Nachbarwerte ist es daher möglich, einen solchen Wert zu überspringen. Die Histogrammanalyse ist ferner ungenau bei ganzzahligen Perioden wie zum Beispiel bei der Nyquist-Grenze (2 Pixel pro Periode). Je nach Lage der Abtastwerte kann der Kontrast an dieser Stelle schon in der Theorie zwischen 0 und  $0,64$  ( $= \frac{\pi}{2}$ ) liegen. Dies ist von der Phasenlage abhängig. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese ungenauen Werte nicht auszuwerten, sondern zu übergehen.

Im Laufe dieser Arbeit wurden bei jedem Verfahren Nachteile und Probleme festgestellt. Die Fourieranalyse ist zwar durch Mittelung der Amplituden über eine Frequenz rauschunempfindlicher als das Histogrammverfahren, zeigt jedoch starke Kontrastschwankungen über die gesamte Modulationskurve, die auch schon in der Simulation auftreten. Auch nachdem ausgeschlossen wurde, dass nicht ganzzahlige Perioden zu den Kontrastschwankungen führen (s. Kap. 4.3.1), blieben in der Praxis je nach Kamerateyp leichte bis starke Schwankungen bestehen. Die Gefahr einer falschen Kontrastberechnung nimmt mit höheren Frequenzen zu. Hier wirkt sich aus, dass der Kontrast bei diesem Verfahren abhängig ist von der Fensterbreite, das heißt von der Ausschnittbreite, über die der Kontrast berechnet wird. Da es mit zunehmender Frequenz zu so genannten Schwebungen kommen kann (s. Abb. 5.5), deren Einhüllende als Moiré-Muster wahrge-

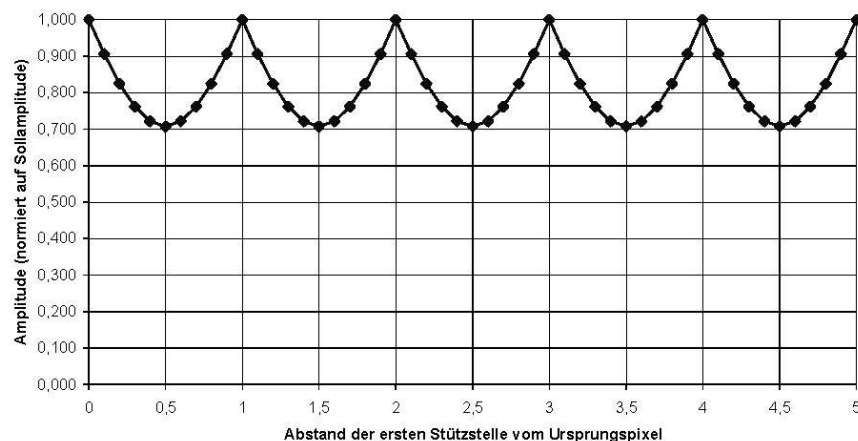


**Abbildung 5.5:** Schwebung mit ungeradzahligem Moiréperiode

nommen werden, ist es sinnvoll, die Modulation über eine ganzzahlige Moiréperiode zu bestimmen. Eine Moiréperiode bezeichnet eine Periode der Einhüllenden einer Schwe-

bung. Bisher wurde dies jedoch nicht berücksichtigt. Daraus kann folgen, dass der Kontrast je nach Ausschnitt aus einer Periode höher oder niedriger als der korrekte Mittelwert berechnet wird.

Nachteilig wirkt sich dies ebenfalls auf das Phasenshiftverfahren aus. Ferner kommt es durch den Online-Phasenshift anstelle des zeitsequentiellen Phasenshifts von vier aufeinander folgenden Aufnahmen zu Problemen bei der Auswertung. Hierbei können die Helligkeitswerte auf unterschiedliche Weise ermittelt werden (vgl. Kap. 4.3.2). Bei Rundung auf das nächstgelegene Pixel kommt es vor allem bei hohen Frequenzen zu starken Abweichungen zwischen dem so angenommen und dem von der Kamera real erzeugten Wert bei Durchführung des regulären Phasenshifts. Bei Interpolation der Helligkeitswerte kann der dabei entstehende Tiefpassfilter wieder heraus gerechnet werden. Vor allem bei hohen Frequenzen hängt hier der Kontrast jedoch ab von der Phasenlage und vom Abstand des zu errechnenden Bildpunktes vom ersten ganzzahligen Pixel, bei dem eine Periode beginnt. Bei 4 Pixel pro Periode kann zum Beispiel der Kontrast bei einem Abstand von  $\frac{1}{2}$  Pixel zum ganzzahligen Pixel um 30% niedriger liegen, als wenn das ganzzahlige Pixel direkt getroffen wird (s. Abb. 5.6). Diese Unzuverlässigkeit



**Abbildung 5.6:** Amplitudenrückrechnung aus interpolierten Pixelwerten bei 4 Pixel pro Periode [HAR]

bei hohen Ortsfrequenzen wird noch dadurch verstärkt, dass beim genutzten Vierer-Phasenshiftalgorithmus bei einer Periodenlänge von weniger als vier und insbesondere von weniger als zwei Pixel folgendes Problem durch Interpolation auftritt. Es werden

---

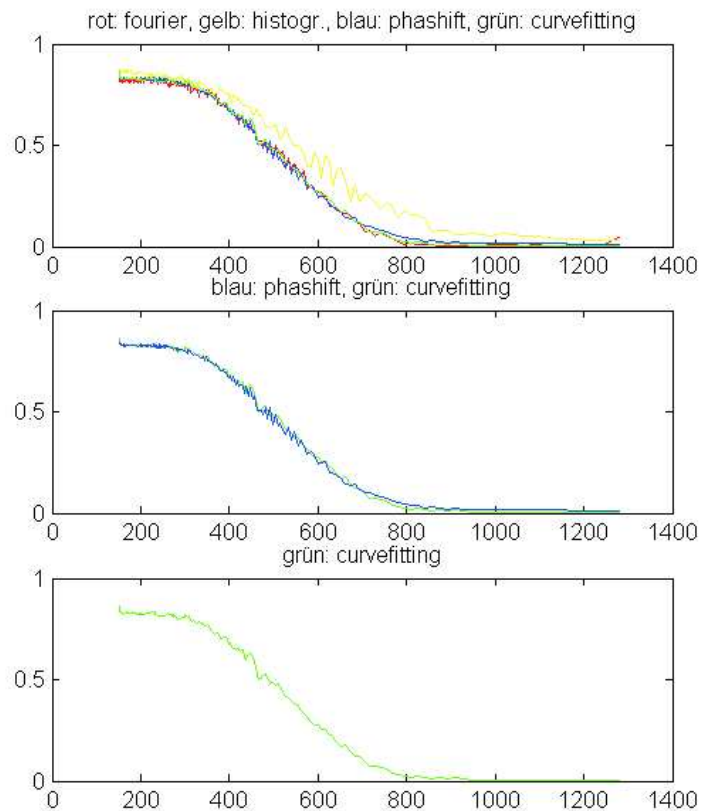
zum Beispiel bei zwei Pixel pro Periode aus den zwei Stützstellen, die von der Kamera abgetastet werden, weitere zwei Werte durch lineare Interpolation berechnet, um das Phasenshiftverfahren anwenden zu können. Dieses benötigt zur Berechnung vier Helligkeitswerte auf einer Periode. Die linear interpolierten Werte liegen jedoch nicht mehr auf der harmonischen Sinusfunktion, sondern auf einer Geraden zwischen den Abtastpunkten. Wenn diese jedoch zur Kontrastberechnung verwendet werden, ist die Berechnung der Modulation falsch. Eine Lösung der Probleme beim Phasenshiftverfahren bestünde darin, anstelle des Online-Phasenshifts tatsächlich vier aufeinanderfolgende Bilder aufzunehmen, bei denen das Eingangssignal jeweils um  $\frac{\pi}{2}$  phasenverschoben ist. Dabei handelt es sich um ein ortsunabhängiges Verfahren. Das heißt, das Verfahren wird nicht von eventuellen Kontraständerungen beeinflusst, die durch die Konstruktion eventuell schon bei benachbarten Pixeln auftreten können. Beim Online-Phasenshift wird der Kontrast innerhalb von 4 Pixeln bestimmt. Voraussetzung ist hier eine homogene Beleuchtung an diesen 4 Bildpunkten.

Ein generelles Problem aller Verfahren ist die Tatsache, dass der CCD-Chip einer digitalen Kamera in der Regel ein rechteckiges Abtastraster besitzt. Es müssen hier jedoch Strukturen abgebildet werden, die kreisförmig angeordnet sind. Hierdurch ergibt sich zwingend die Auswertung eines Kreisbogens, dieser kann jedoch immer nur annähernd ermittelt werden, weil die Darstellung eines exakten Kreises nicht möglich ist (s. Kap. 2.2.1). Die Voraussetzung gleichabständiger Abtastwerte zur Durchführung der Fouriertransformation kann aus diesem Grunde ebenfalls nicht erfüllt werden. Der Abstand der Mittelpunkte der Pixel auf einem Kreisbogen ist zum Beispiel in der Diagonalen größer als horizontal oder vertikal. Der reale Abstand der Abtastwerte ist auf einem Kreisbogen demnach nicht äquidistant. Hierdurch kann es bei der Fouriertransformation zu fehlerhafter Kontrastberechnung kommen. Auch die verbleibenden Modulationsschwankungen mögen dadurch bedingt sein.

Beim Phasenshiftverfahren wird dieses Problem insofern umgangen, als durch die Interpolation über die vier benachbarten Bildpunkte eine Berechnung der Helligkeitswerte an den exakten Koordinatenpositionen erfolgt. Der Pixelabstand der vier benötigten Punkte wird hier abhängig vom Winkel bestimmt und beträgt  $\frac{\pi}{2}$ .

Das Fit-Verfahren (curve-fitting) löst dieses Problem, indem es ebenfalls das Pixel-

raster über die Winkelkoordinaten aufträgt. Die Approximation erfolgt über die so dargestellten Helligkeitswerte, deren Abstand dadurch korrekt ermittelt wurde. Durch die kurzfristige Aufnahme dieser Methode konnte aus Zeitgründen, wie bereits erwähnt, kein kompletter Vergleich mit allen Verfahren durchgeführt werden. Abbildung 5.7 zeigt

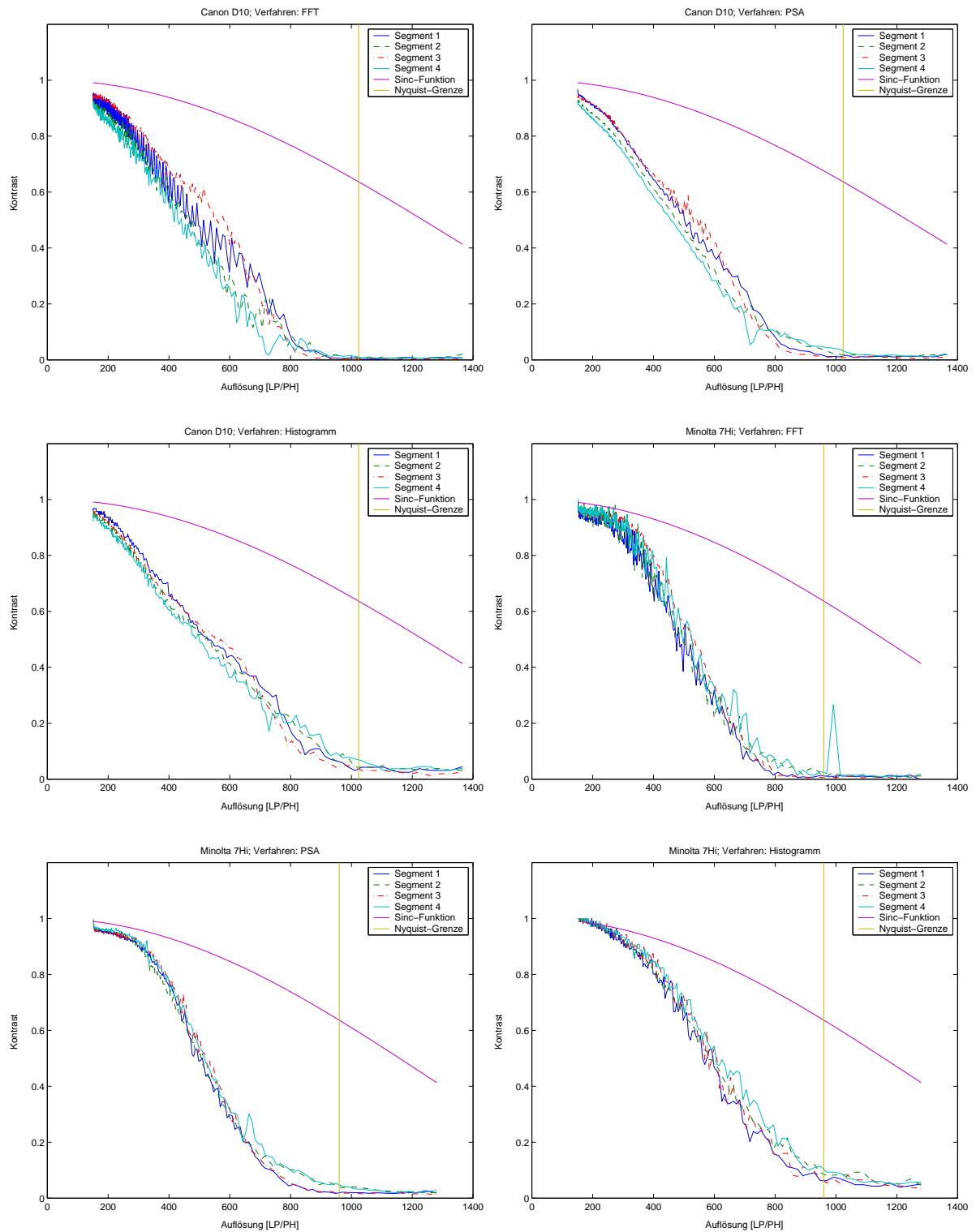


**Abbildung 5.7:** Vergleich aller Methoden mit Minolta Dimage 7Hi

exemplarisch den nahezu identischen Kontrastverlauf des Fit-Verfahrens, der Fouriertransformation und des Phasenshiftalgorithmus'. Die MTF des Fit-Verfahrens besitzt dabei einen glatteren Verlauf als die der anderen beiden Methoden.

Ein Siemensstern als Testmuster bietet den Vorteil, dass sowohl horizontale, als auch vertikale und diagonale Strukturen vorhanden sind. Aus diesem Grund wurde der Stern für die Auswertung in 8 Segmente unterteilt (s. Abb. 4.6). Abbildung 5.8 zeigt für jedes Verfahren einen Vergleich der verschiedenen Ausschnitte. Je nach Kameratyp kann es hier zu Kontrastunterschieden zwischen den einzelnen Segmenten kommen.

Die in Abbildung 5.9 dargestellten verschiedenen Bildqualitäten ergeben in der Kon-



**Abbildung 5.8:** Vergleich zwischen unterschiedlichen Segmenten eines Siemenssterns



trastauswertung bei allen drei Verfahren kaum Unterschiede. Bei den Bildqualitäten handelt es sich um verschiedene Kompressionsstufen, die in diesem Fall mit den Begriffen „best“, „normal“ und „worst“ bezeichnet werden. In der Regel sind bei digitalen Kompaktkameras Stufen wählbar, die die Stärke der JPEG-Kompression angeben. Einen Einfluss dieser Komprimierung auf die Modulation konnte jedoch bei den vorliegenden Kameras nicht festgestellt werden.

Unterschiedliche Auswirkungen der Bildverarbeitung nach der Aufnahme des Bildes sind hingegen bei dem Vergleich zwischen den verschiedenen Schärfegraden einer Kamera zu erkennen (s. Abb. 5.10). Um die Bildschärfe zu beeinflussen, wird dabei nachträglich ein Filter auf das digitale Bild angewendet, der eine so genannte Kantenaufsteilung durchführt. Dadurch werden Kanten im Bild verstärkt und somit ihr Kontrast erhöht. Dabei kann die Kantenaufsteilung auch richtungsabhängig erfolgen. Es werden beispielsweise Kanten in horizontaler Richtung stärker aufgestellt, als solche in vertikaler Richtung. Wie Abbildung 5.10 zeigt, besteht mit Hilfe eines solchen Filters die Möglichkeit, die Obergrenze der sinc-Funktion zu überschreiten und somit den Kontrast auf größer als Eins zu erhöhen. Die Histogrammauswertung zeigt, dass dieses Verfahren aufgrund der Art der Kontrastberechnung nur einen maximalen Kontrast von Eins erreichen kann. Die Option, die Schärfegrade in Stufen von „hart“, „mittel“ und „soft“ zu beeinflussen, ist nicht bei jeder Consumerkamera gegeben. Es ist möglich, dass der Kontrast bei einer solchen Kamera je nach Stärke der Kantenaufsteilung durch die interne Bildverarbeitung größer als Eins wird.

### 5.1.3 Vergleich mit SFR-Verfahren

Die so genannte SFR-Methode (Spatial Frequency Response = örtliche/ räumliche Frequenzantwort), die in ISO 12233 beschrieben ist, soll abschließend mit den in dieser Arbeit ausgearbeiteten Verfahren verglichen werden. Da dieses Verfahren Schwächen bei Digitalkameras aufweist, bei denen nicht auf die Rohdaten zugegriffen werden kann, wurde für diese Gegenüberstellung die digitale Spiegelreflexkamera Nikon D100 verwendet, bei der dieses möglich ist. Die Bestimmung der MTF erfolgt bei der Auswertung über die SFR-Methode für jeden Farbkanal. Dies wurde bei den Verfahren in dieser

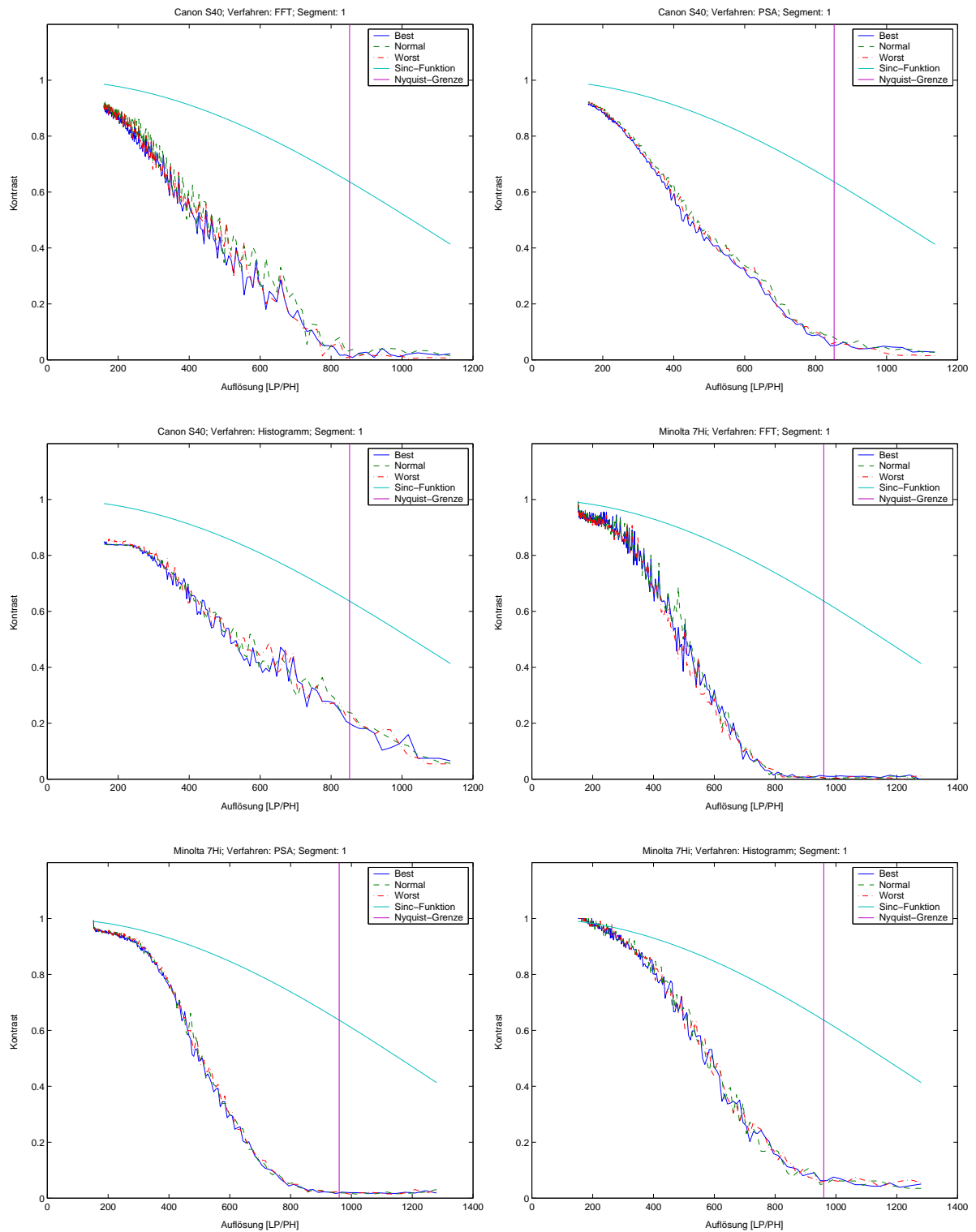


Abbildung 5.9: Vergleich zwischen unterschiedlichen Bildqualitäten

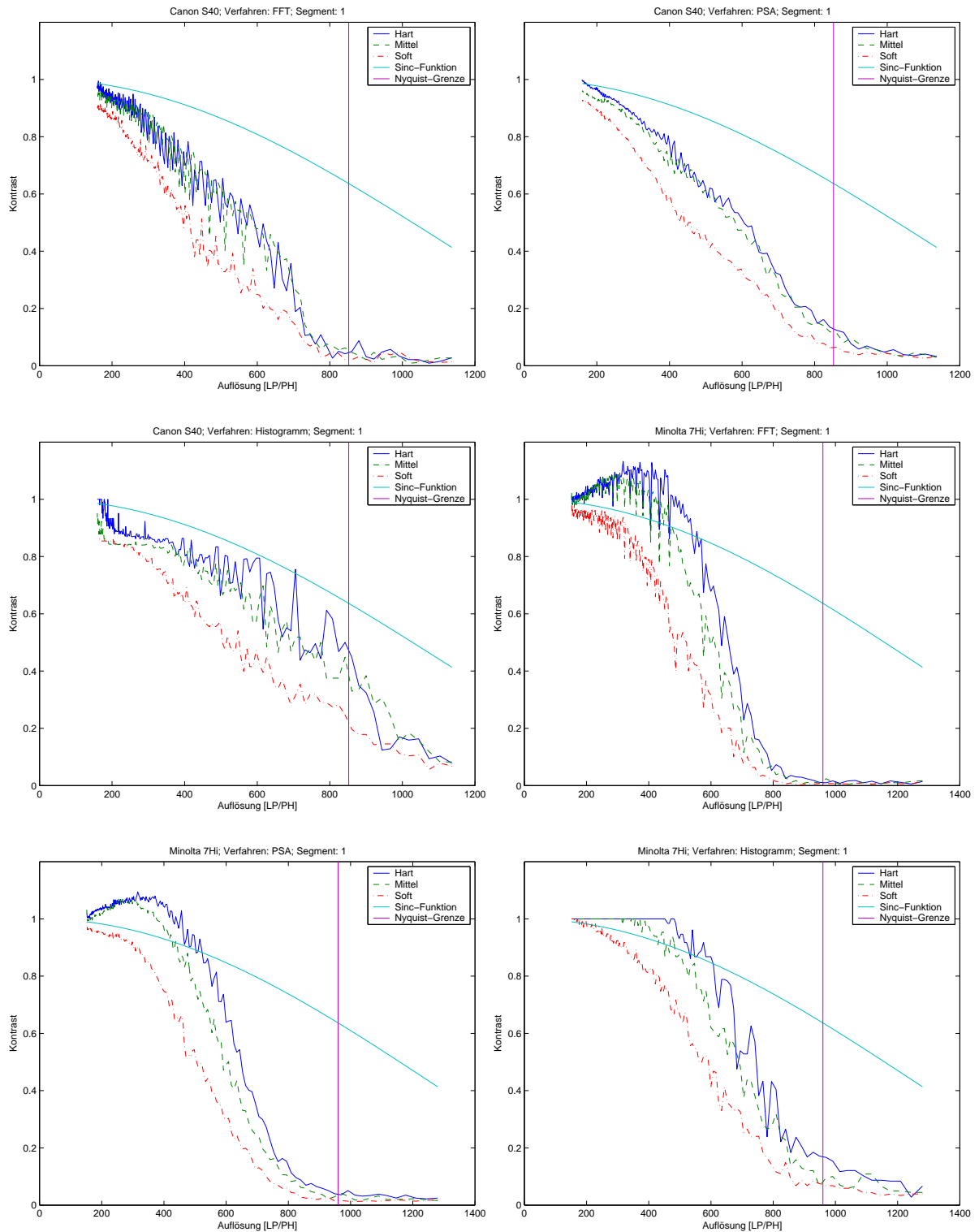
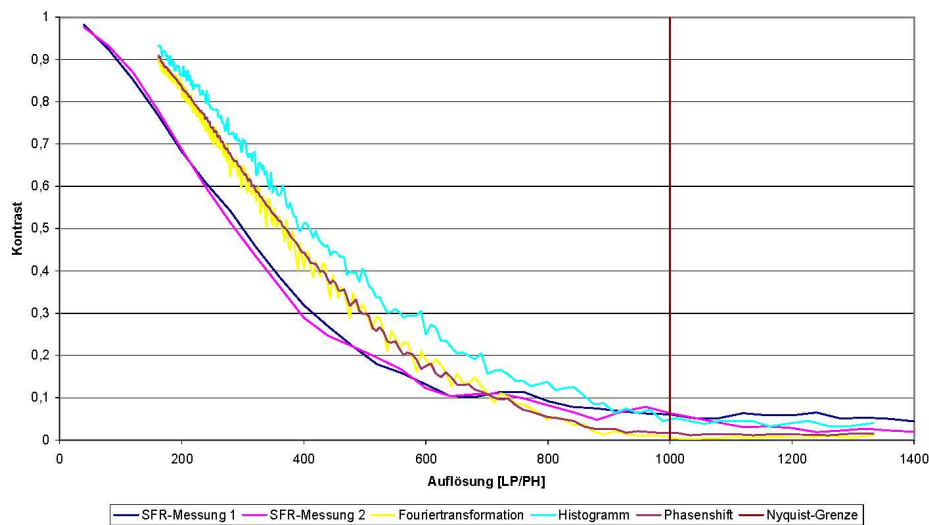


Abbildung 5.10: Vergleich verschiedener Bildschärfen

Arbeit nicht so durchgeführt. Der Vergleich der horizontalen Strukturen in Abbildung 5.11 zeigt lediglich den Rotkanal der Kamera bei den SFR-Messungen. Ferner wertet



**Abbildung 5.11:** Vergleich der horizontalen Strukturen zwischen SFR-Methode und der in dieser Arbeit erarbeiteten Verfahren

diese Methode zwei horizontale Strukturen aus, die hier durch „SFR-Messung 1“ und „2“ gekennzeichnet sind. Vergleichend lässt sich feststellen, dass der Kontrast, der mit Hilfe der in dieser Arbeit getesteten Verfahren ermittelt wurde, oberhalb der über die SFR-Methode berechneten Modulation liegt. Die Form der beiden Kurven weicht dabei im Bereich niedriger Frequenzen nicht stark voneinander ab. Zur Nyquist-Grenze hin nähern sich die Verfahren aneinander an. Welches Verfahren nun die „richtigen“ Ergebnisse liefert, kann hier nicht definitiv festgestellt werden, dies bleibt weiteren Tests in der Praxis überlassen.

## 5.2 Schlussfolgerungen und Möglichkeiten

Innerhalb der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Zeit konnte nicht endgültig geklärt werden, welches der getesteten Verfahren für die Auflösungsmessung von digitalen Kameras am geeignetsten ist. Methodisch ist das Fit-Verfahren am günstigsten, da es die Eigenschaften des harmonischen Siemenssterns am besten ausnutzt. Dies gelingt

vor allem dadurch, dass die Verwendung der Helligkeitswerte mit dem korrekten Pixelabstand erfolgt, um daraus einen harmonischen Verlauf zu ermitteln. Bislang wurden bei allen anderen Verfahren Schwächen entdeckt, die an der Fähigkeit, die MTF eindeutig zu bestimmen, zweifeln lässt. Zwei dieser Methoden liefern jedoch Ergebnisse, die bei den Tests nah beieinander liegen. Es handelt sich dabei um die Kontrastbestimmung mit Hilfe der Fouriertransformation und mit Hilfe des Phasenshiftverfahrens. Dies überrascht zum Teil dadurch, dass beispielsweise beim Phasenshiftverfahren nicht abschließend geklärt werden konnte, wie groß der Fehler zum Beispiel durch Interpolation über vier Pixel wirklich ist, der bei der Auswertung entsteht. Auch die Fouriermethode hat ihre Schwächen. So bleibt es weiterhin ein Problem, bei einem kreisförmigen Testmuster wie dem Siemensstern aus einem Rechteckgitter als Pixelraster äquidistante Werte für die Auswertung zu erhalten. Dies ist jedoch Voraussetzung für die Fouriertransformation. Trotz der entdeckten Schwachstellen und möglichen Fehlerquellen der beiden Verfahren scheinen sie in der Praxis doch vernünftige Ergebnisse zu liefern. Erste Vergleichstest mit dem Fit-Verfahren bestätigen den Verlauf der Fourier- und Phasenshiftmethode (s. Abb. 5.7). Dennoch sollten hier weitere Tests durchgeführt werden, um endgültig ein Verfahren zu finden, dass die Modulationsübertragungsfunktion digitaler Kameras zuverlässig ermittelt. Die Kontrastberechnung über Fouriertransformation, Phasenshiftalgorithmus und Fit-Verfahren sollten demnach weiterentwickelt und perfektioniert werden. Für das Histogrammverfahren ergab sich bislang keine weitere Bestätigung. Die Kurven liegen höher als die der anderen Verfahren, da hier der Kontrast über die tatsächlichen Werte von  $I_{max}$  und  $I_{min}$  berechnet wird. Hier müsste der Schwerpunkt einer Weiterentwicklung vor allem auf der Entwicklung von Kriterien liegen, die eventuelle „Ausreißer“ bei den maximalen und minimalen Helligkeitswerten besser bestimmen.

Es blieb ebenfalls nicht ausreichend Zeit für abschließende Tests des angefertigten Auswertungsprogramms und zu seiner Perfektionierung. So hat das angewandte Schwerpunktverfahren, wie es bislang die Mittelpunkte der Siemenssterne bestimmt, Schwierigkeiten bei starker Verzeichnung. Hier muss noch nachgebessert werden.

Ferner ist die Entwicklung eines Testcharts nötig, mit dem auch Modulationsübertragungsfunktionen hochauflösender Digitalkameras problemlos bestimmt werden können.

Was in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurde, ist die Festlegung einer Auflösungsgrenze für digitale Kameras beziehungsweise eine Bewertung der MTF. Es ist bislang auch nicht eindeutig festgelegt, bei welchem Kontrast die Auflösungsgrenze eines Systems liegt. Es bleibt jedem Anwender daher selbst überlassen, wo er diese zieht. Hier soll lediglich kurz eine Möglichkeit erläutert werden. Don Williams und Peter D. Burns [WIL] begründen ihre Wahl der Auflösungsgrenze mit Hilfe des Rayleigh-Kriteriums. Dies besagt, dass zwei Punkte noch voneinander unterscheidbar sind, wenn das Hauptintensitätsmaximum des einen mit dem ersten Intensitätsmaximum des anderen zusammenfällt. Im kombinierten Helligkeitsverlauf der zwei Punkte liegt dann das Verhältnis der Intensität am Mittelpunkt zu der des Maximums bei  $\frac{\delta}{\pi^2} = 0,811$ . [BOR] Ist demnach  $I_{max} = 1$  und dementsprechend  $I_{min} = 0,81$  dann ergibt sich ein Kontrast von

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{1 - 0,81}{1 + 0,81} = 0.105 \quad (5.1)$$

Diese Grenze setzen Williams und Burns daher als Auflösungsgrenze an. Es soll hier aber betont werden, dass der komplette MTF-Verlauf einer Kamera mehr aussagt als ihre absolute Auflösungsgrenze. So kann eine Digitalkamera eine MTF besitzen, die über alle Ortsfrequenzen einen niedrigen Kontrast liefert, dabei aber eine höhere endgültige Auflösungsgrenze hat, als eine MTF, die bei niedrigen Frequenzen hohe Kontrastwerte ergibt. Welcher Kontrastverlauf jedoch vorzuziehen ist, muss individuell entschieden werden.

## 6 Fazit

Diese Diplomarbeit hatte zum Ziel, ein Verfahren zu entwickeln, dass die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) digitaler Kameras zuverlässig ermittelt. Hierzu wurden folgende verschiedene Methoden der Auflösungsmessung untersucht: Die Kontrastmessung mit Hilfe der Fouriertransformation, des Phasenshiftalgorithmus', des Histogramms und der Approximation der kleinsten Quadrate (Fit-Verfahren).

Als Testchart diente zunächst ein binärer, später ein harmonischer Siemensstern. Durch seinen harmonischen Verlauf verfälscht letzterer im Vergleich zu seiner binären Variante nicht die Ergebnisse, weshalb er dieser vorzuziehen ist.

Der Vergleich der unterschiedlichen Verfahren verdeutlichte, dass die Auflösungsmessung digitaler Kameras einige Schwierigkeiten mit sich bringt. So ergaben sich bei Phasenshiftverfahren sowie Fourier- und Histogrammanalyse Probleme. Dennoch liefern die beiden erstgenannten Verfahren sinnvolle Ergebnisse. Als günstigste Methode stellte sich das Fit-Verfahren heraus. Es konnte aus zeitlichen Gründen jedoch nicht mehr ausreichend getestet werden.

So bleibt es der praktischen Anwendung überlassen, dieses eingehend zu prüfen, mit der Fouriermethode und dem Phasenshiftverfahren zu vergleichen sowie gegebenenfalls Verbesserungen an den Verfahren vorzunehmen.

# A Literaturverzeichnis

- [BJO] Björk, Ake, Dahlquist, Germund: „Numerische Methoden“, R. Oldenburg Verlag, München Wien 1972
- [BOR] Born, Max, Wolf, Emil: Principles of Optics, Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, 5th Edition, Pergamon Press, 1975, S. 333/334
- [GRA] Gramlich, Günter: Numerische Mathematik mit Matlab: Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure, 1. Auflage, dpunkt-Verlag, Heidelberg, 2000
- [HAR] Harand, Bernd, Dipl.-Phys. (Leica Camera AG): Email vom 03.04.2003
- [HEC] Hecht, Eugene: Optik, 3. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2001, S.820 - 821 und S. 448
- [HIL] Hiller, Monika: Skript zur Vorlesung Optik, Prof. Dr. J. Gutjahr, SS 2000 - WS 2000/2001, Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik
- [ISO] International Standard, ISO 12233, Photography – Electronic still-picture cameras – Resolution measurements, First edition 2000-09-01, Reference number: ISO12233:2000(E)
- [KLI] Klingen, Bruno: Fouriertransformation für Ingenieur- und Naturwissenschaften, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2001
- [KLS] Klingen, Bruno, Prof. Dr.: Schriftliche Mitteilung zum Fit-Verfahren vom 27.05.2003



- [DBV] Kunz, Dietmar, Prof. Dr.: Skript zur Vorlesung Digitale Bildverarbeitung, WS 2001/2002, Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik
- [LUB] Lubitz, Pamela: Skript zur Vorlesung Optik I – Messtechnik, Prof. Dr. J. Gutjahr, SS 2001, Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik
- [MA1] The MathWorks Inc.: Image Processing Toolbox User’s Guide - For Use with MATLAB, Version 3
- [MA2] The MathWorks Inc.: MATLAB Function Reference Volume 2: F - O, Version 6
- [HOL] Praktikumsanleitung Holographie, SS 2001, S. 24 – 26
- [OPT] Praktikumsanleitung Optik I - Photometrie und Messtechnik, Versuch 3, WS 2002/2003, Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik
- [SDP] Schülerduden Die Physik, hrsg. und bearb. von Meyers Lexikonredaktion in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Klaus Bethge, 3. Auflage, Dudenverlag, 1995
- [STO] Stöbel, Wolfgang: Fourieroptik - Eine Einführung, Springer-Verlag, 1993, S. 1 – 33
- [TON] Tontechnik, Mitschrift zur Vorlesung, Prof. Dr. F. Stollenwerk, SS 2000 - WS 2000/2001, Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik
- [WEB] Weber, Johannes: Handbuch der Film- und Videotechnik, 5. Auflage, Franzis’ Verlag GmbH, 1998, S.178 - 182
- [WIL] Williams, Don, Burns, Peter D., Eastman Kodak Company, Rochester, New York: Diagnostics for Digital Capture using MTF, IS&T’s 2001 PICS Conference Proceedings
- [WUL] Wüller, Dietmar, Dipl.-Ing. (Image Engineering Dietmar Wüller): Vortrag: Pro and contra using ISO 12233 for resolution measurements, Photokina 2002

## B Inhalt der CD

- Auswertungsprogramm „Digimaster“
  - Programmdateien
  - Installationsanleitung (setup.rtf)
- Messergebnisse
  - Vergleich der Verfahren (Februar 2003)
  - Vergleich zwischen binärem und harmonischem Siemensstern
  - Vergleich aller verwendeten Verfahren
  - Vergleich mit SFR-Verfahren
  - Testbilder zu den Messungen (sind bei den Ergebnissen jedes Vergleichs zu finden)
  - Linearisierung
  - Phasenshift-Interpolationsfehler
- Diplomarbeit als pdf-Dokument

# **C Erklärungen**

## **C.1 Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere hiermit, die vorgelegte Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Köln, den 13.06.2003

---

(Anke Neumann)

## **C.2 Sperrvermerk**

Die Einsicht in die vorgelegte Arbeit ist bis zum 13.06.2005 gesperrt.

### **C.3 Weitergabenerklärung**

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass das vorliegende Exemplar meiner Diplomarbeit oder eine Kopie hiervon für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden darf.

Köln, den 13.06.2003

---

(Anke Neumann)