

Optik in der industriellen Bildverarbeitung

Eine Einführung

Dr. Tobias Haist
Institut für Technische Optik
Universität Stuttgart

Dr. Christian Kohler
TWIP Optical Solutions
Stuttgart

V0.1, Oktober 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Grundaufgaben der industriellen Bildverarbeitung	4
2	Auslegung der Abbildung	7
2.1	Abbildung mit einer Linsengruppe	7
2.2	Abbildung mit zwei Linsengruppen	13
2.3	Blende und Pupille	18
2.3.1	Blendenzahl und Pupillen	20
2.4	Schärfentiefe	24
2.5	Perspektive	27
2.6	Zusammenfassung wesentlicher Parameter	30
3	Mathematische Beschreibung der Bildentstehung und das Abtasttheorem	33
3.1	Lineare, invariante Systeme	34
3.2	Eigenfunktionen und die Fouriertransformation	40
3.3	Die Fouriertransformation von Bildern	44
3.4	Berechnung	45
3.5	Einige Fourierpaare	46
3.6	Das Abtasttheorem	49
3.7	Zusammenhang mit Optik und Bildverarbeitung	53

4	Transferfunktion	57
4.1	Nochmals Faltung und Multiplikation	57
4.2	Zusammenschaltung von MTFs	63
4.3	Einige Beispiele	65
4.4	Grenzen	69
4.5	Nochmal das wichtigste	71
5	Laterale Auflösung	74
5.1	Zur Definition von Auflösung	76
5.2	Bildfehler	78
5.3	Vignettierung	83
5.4	Modulationstransferfunktion	85
5.5	Vorgehen zur Festlegung von Bildsensorauflösung und Auflösung der Optik	88
5.6	Sensorgröße und Pixelgröße	98
5.7	Weitere Auflösungskennzahlen	103
5.8	Positionsauflösung	107
5.9	Kohärente Abbildungen	110
5.10	Auflösungsreduktion bei Farbsensoren	115
6	Objektive	118
6.1	Weitere Beurteilungskriterien	120
6.2	Foto- und Bildverarbeitungsobjektive	124
6.3	Telezentrische Objektive	126
6.4	Objektive für Zeilenkameras	127
6.5	Mikroskopische Abbildungen	127

6.6	Scheimpflug Bedingung	130
6.7	Filter und Schutzgläser	130
6.7.1	Farbfilter	131
6.7.2	Schutzgläser	133
6.7.3	Polarisationsfilter	133
6.8	Infrarotoptiken	133
6.9	Reinigung und Pflege	134
7	Fotometrie und Radiometrie	136
7.1	Lichttechnische Größen	136
7.1.1	Bestrahlungsstärke auf dem Bildsensor	143
7.2	Streuung und beleuchtete Flächen	145
7.3	Wechselwirkung des Lichts mit dem Objekt	147
7.4	Spektralbereiche und Farbe	149
8	Beleuchtung	151
8.1	Beleuchtungsgeometrien und Beleuchtungsoptik	152
8.1.1	Durchlicht	154
8.1.2	Auflicht	155
8.2	Linienbeleuchtung	163
8.3	Wahl der Wellenlänge	164
8.4	Fremdlicht	165
8.5	Lichtquellen	167
8.5.1	Thermische Quellen: Halogenlampen	172
8.5.2	Bogenlampen	175
8.5.3	Leuchtstofflampen	175

8.5.4	Lichtemittierende Dioden (LED)	177
8.5.5	Laser	179
8.6	Spezielle Techniken	181
8.6.1	Fluoreszenz	181
9	Bildsensoren	183
10	Andere Signalaufnehmer	184
11	Spezifikation	185
11.1	Musterkatalog	188
11.2	Messen, Prüfen und Rückführbarkeit	188
11.3	Spezifikation von Defekten	193

.

Einführung

In diesem Buch soll ein eher stiefmütterlich behandelter Bereich der industriellen Bildverarbeitung, nämlich die Auswahl der Hardware von Bildverarbeitungssystemen besprochen werden. Konkret soll dargestellt werden, wie in systematischer Weise Abbildungs- und Beleuchtungsoptiken, Beleuchtungsquellen und Bildaufnehmer zu wählen und zu spezifizieren sind. Insbesondere für die Komponenten Objektiv, Beleuchtungsquelle und Kamera werden detailliert die technischen Angaben in Datenblättern besprochen, um eine Auswahl in der Praxis zu ermöglichen. Die hierfür notwendigen Grundlagen werden dargestellt.

Obwohl es sich um ein extrem praxisnahes Thema handelt sind wir dennoch teilweise gezwungen, in sehr deutlicher Form von dem abzuweichen, was industrielle Praxis ist.

Die Industrielle Bildverarbeitung ist ein interdisziplinäres und sehr erfahrungsorientiertes Arbeitsgebiet (wir vermeiden hier den Begriff "Wissenschaft"). Während sich in der Bildverarbeitungsalgorithmik durchaus eine wissenschaftliche Vorgehensweise durchgesetzt hat, erfolgt die Auswahl der Bildverarbeitungshardware in 99% der Anwendungsfälle basierend auf meist trivialen Grundüberlegungen und vor allem viel Erfahrung.

Dagegen ist zunächst nichts einzuwenden. Wenn genügend Erfahrung vorhanden ist, um sicher sagen zu können, welche Implementierung eine Aufgabe löst, dann sollte die Erfahrung auch genutzt werden. Industrielle Bildverarbeitung ist aber auch sehr individuell.

Der erfahrene Entwickler einer Bildverarbeitungsanwendung wird daher eine möglichst ähnliche Anwendung, die er bereits implementiert hat als Basis seiner Überlegungen verwenden und basierend hierauf eine Lösung für die anstehende Aufgabenstellung wählen. Das kann, muss aber nicht gut gehen und natürlich steht und fällt diese Vorgehensweise mit dem Maß der Ähnlichkeit zu bisherigen Aufgaben, der Schwierigkeit der Aufgabe und der Erfahrung des Entwicklers. Eine annähernd optimale Auswahl der Hardwarekomponenten eines BV-Systems wird man auf diese Weise selten treffen können.

Es ist daher für den Studenten der Bildverarbeitung unerlässlich, die Grundlagen

der Auswahl wirklich zu verstehen und sich nicht auf den Zufall bzw. das Glück bei der Hardwareauswahl zu verlassen. Dieses Wissen soll in diesem eBook in möglichst kurzer Form und parallel zur Vorlesung vermittelt werden. Dabei werden wir versuchen, die Theorie auf genau das gerade noch minimal Notwendige zu beschränken. Ableitungen und Beweise werden wir also meist auslassen und stattdessen im Sinne des puren Ingenieurvorgehens vor allem erklären, *wie Systeme auszulegen sind und uns der Frage des warum eher anschaulich als mathematisch nähern.*

Beachten Sie: Die vorliegende Version des eBooks ist noch nicht korrigiert und ist noch an verschiedenen Stellen sehr unvollständig. (Falls Sie inhaltliche Fehler entdecken: Bitte melden.). Geben Sie auch die bisherige Version nicht weiter. Sobald eine verbesserte Version vorhanden ist, wird diese im Internet frei verfügbar sein.

Kapitel 1

Grundaufgaben der industriellen Bildverarbeitung

Die industrielle Bildverarbeitung wird heute in nahezu allen industriellen Anwendungen eingesetzt. Von der Nahrungsmittelproduktion bis zur Überwachung von Personen oder Fertigungsprozessen, von der Kontrolle von zugelieferten Materialien bis zur Endkontrolle von fertigen Maschinen, der Mensch wird zunehmend durch kamerabasierte oder anderweitig optisch erfassende Systeme abgelöst.

Die Hauptvorteile der maschinellen Kontrolle sind dabei natürlich eine Einsparung von Kosten und eine Erhöhung der Qualität. Entsprechende Systeme können rund um die Uhr ohne Ermüdung arbeiten und wesentlich schneller als Menschen hochgenau Objekte vermessen und das Ergebnis beurteilen. Subjektive Beurteilungen werden durch objektive ersetzt.

Während der Mensch bei der Analyse bzw. Deutung komplexer Szenen dem Computer nach wie vor meilenweit überlegen ist, ist er gleichzeitig bei der fortlaufenden Beurteilung klar definierter metrischer Größen modernen Messsystemen natürlich hoffnungslos unterlegen. Mittels interferometrischer Methoden lassen sich heute leicht Höhenbestimmungen im Nanometerbereich durchführen und mit vollflächigen Verfahren lassen sich in Sekundenbruchteilen große Flächen auf kleinste Defekte untersuchen.

Der damit einhergehende Verlust an Arbeitsplätzen in der Inspektion und die zunächst anfallenden Investitionskosten werden zugunsten dieser Vorteile heute zunehmend in Kauf genommen so dass die industrielle Bildverarbeitung ein stetig wachsender Markt ist.

Die sich dabei ergebenden Aufgaben sind so vielfältig wie die modernen Produktion selbst. Typische Grundaufgaben sind

- Objekte identifizieren, klassifizieren oder sortieren
- Objekte prüfen, z.B. Form, Oberfläche, Defekte im Volumen, Vollständigkeitsprüfung
- Objekte (bzw. ihre Eigenschaften) messen
- Objekte positionieren bzw. die Lage erkennen
- Steuerung von Anlagen
- Absicherung von Prozessen oder Anlagen

Dabei ist zwischen den Aufgaben oft nicht eindeutig im Sinne einer (sinnvollen) Definition zu trennen. Prüfen kann z.B. oft als Klassifikation in "gut" und "schlecht" angesehen werden. Und In vielen Fällen ist für eine Prüfung zunächst eine Vermessung notwendig. Prüfen kann aber auch eine Vollständigkeitsprüfung meinen und in diesem Fall ist wieder die Identifikation bzw. Klassifikation das Wesentliche.

Wichtig ist an sich "nur", dass eine klare und eindeutige Vorstellung von der durch die Bildverarbeitung zu absolvierenden Funktion besteht. Da diese klare Beschreibung der Funktion oftmals alles andere als einfach und in vielen konkreten Anwendungen nicht gegeben ist werden wir hierauf später noch ausführlich zu sprechen kommen (vgl. Kapitel 11).

Immer wenn Messungen Teil der Aufgabenstellung sind, dann ist der Fehlerbetrachtung und der sogenannten Rückführbarkeit viel Aufmerksamkeit zu widmen. Auch hierauf werden wir einzugehen haben.

Den Schwerpunkt der Darstellung wird aber der Aufbau von Bildverarbeitungssystemen aus Sicht des Optikers sein, d.h. die konkrete Wahl der Optik, der Bilderfassungskomponenten sowie der Beleuchtung. Abb. 1.0.1 zeigt ein typisches Bildverarbeitungssystem und damit gleichzeitig die Schwerpunkte des hier dargestellten Inhalts.

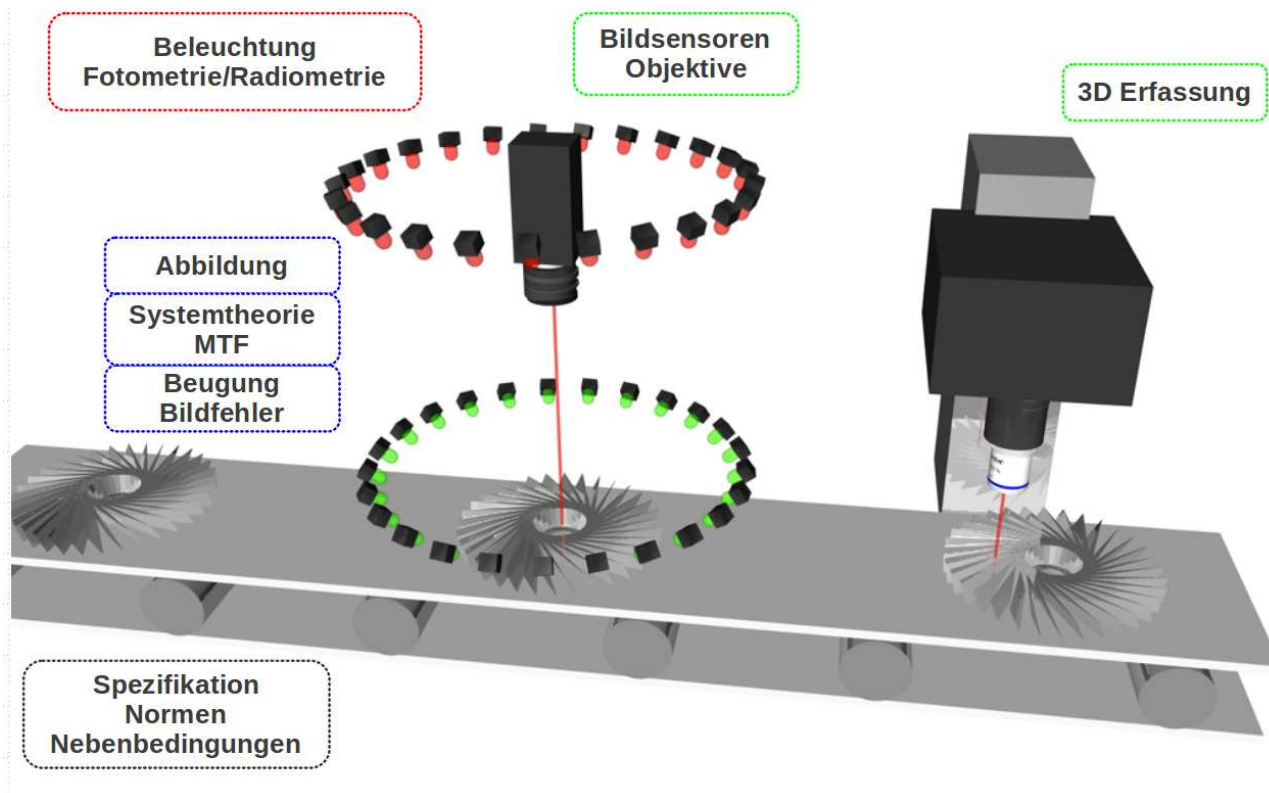


Abbildung 1.0.1: Wesentliche optische Teilaspekte der industriellen Bildverarbeitung

Hinsichtlich der optischen Grundlagen werden wir uns vor allem mit den folgenden Grundfragen der optischen Abbildung beschäftigen:

- Wo liegt der einzelne Bildpunkt (Paraxiale Optik) ?
- Welche Form hat der einzelne Bildpunkt (Auflösung, Beugung und Bildfehler) ?
- Wie hell ist der einzelne Bildpunkt (Photometrie und Radiometrie) ?
- Wie erfolgt die Umwandlung des optischen Signals in ein digitales Signal (Bildsensoren und Interfaces) ?
- Wie kann die gesuchte Information optisch aufbereitet werden (Beleuchtungsgeometrien, Filter) ?

Neben der grundlegenden Theorie sind aber vor allem praktische Aspekte, z.B. Wahl der Leuchtmittel und konkrete Wahl von Objektiven, für uns wichtig.

Kapitel 2

Auslegung der Abbildung

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Wie man eine einstufige Abbildungsgeometrie auslegt.
- Welche Arten von Perspektiven es gibt und was hinsichtlich der Perspektive zu beachten ist.
- Wie man die sehr gebräuchliche Kepleranordnung als zweistufiges System einsetzt.
- Wie man die Öffnung der Optik spezifiziert und wie sie sich auf den Schärfentiefenbereich auswirkt.
- Was die Pupillen eines optischen Systems sind und wozu wir diese benötigen.

2.1 Abbildung mit einer Linsengruppe

Im folgenden werden wir so kurz wie möglich an die wesentlichen Grundlagen der geometrisch-optischen Abbildung erinnern. Für Ableitungen oder Details verweisen wir auf die Vielzahl geeigneter Einführungen (z.B. [8]) und Referenzen (z.B. [5]). Sie werden feststellen, dass man eigentlich mit nur zwei einfachen Gleichungen, die Abbildungsgeometrie einer typischen Abbildung in der Bildverarbeitung festlegen kann. Zwei dieser drei Gleichungen ergeben sich ganz direkt aus dem Strahlensatz. Sie können dazu von einer Kamera mit sehr wenig geöffneter Blende bzw. einer Lochkamera ausgehen (Abb. 2.1.1).

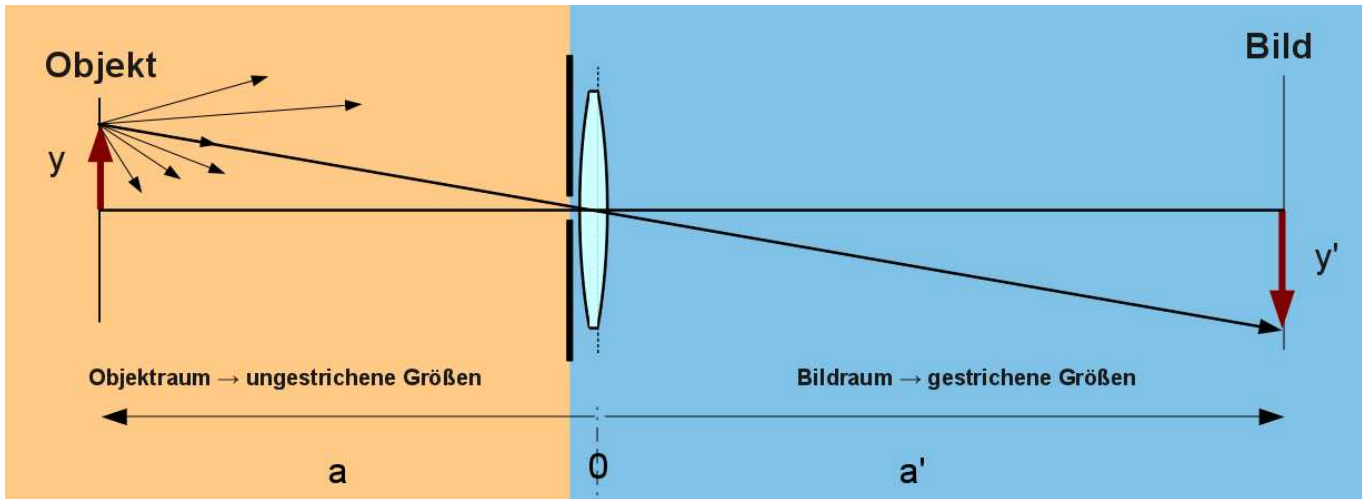


Abbildung 2.1.1: Typische optische Abbildungsgeometrie, hier am Beispiel einer Linsen- oder Lochkamera. Der (laterale) Abbildungsmaßstab y'/y ergibt sich direkt nach dem Strahlensatz zu $\beta' = y'/y = a'/a$. Der eingezeichnete Strahl ist der sogenannte "Hauptstrahl" des Objekt- bzw. Bildpunktes.

Nach dem Strahlensatz gilt für den sogenannten **Abbildungsmaßstab**¹ (magnification) β' , also das Verhältnis von Bildgröße y' zur Objektgröße y

$$\beta' := \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (2.1)$$

Hier und im folgenden verwenden wir gestrichene Größen für den Bildraum (in Abb. 2.1.1 *rechts* vom optischen System) und ungestrichene Größen für entsprechend Größen im Objektraum (*links* vom optischen System). Der Abstand des optischen Systems zum Objekt wird **Objektweite** genannt und mit a bezeichnet. In unserem einfachen Abbildungsmodell ist die Objektweite gleichbedeutend mit dem sogenannten **Arbeitsabstand** der Optik², oft auch als "Minimal Object Distance (MOD)" bezeichnet. Entsprechend ist der Abstand des optischen Systems zur Bildebene die **Bildweite** und wird durch a' bezeichnet.

¹Umgangssprachlich und leider in großem Maße im Bereich der Bildverarbeitung wird oft der Begriff "Vergrößerung" verwendet. Dies ist problematisch, denn in der Optik bezeichnet "Vergrößerung" normalerweise eine Winkelvergrößerung. Selbst in den DIN Normen widersprechen ergeben sich widersprüchliche Angaben zum Begriff der Vergrößerung, also die Vergrößerung, die z.B. ein Fernrohr bewirkt (angular Magnification). In der Mikroskopie wird "Vergrößerung" als "laterale Vergrößerung" für den (lateralen) Abbildungsmaßstab verwendet. Bei Okularen oder Fernrohren, die auf das Auge bezogen sind wird teilweise für die Vergrößerung eine Definition über den Tangens des Winkels und teilweise über den Winkel direkt verwendet (vgl. DIN 8039, DIN 1335).

²Der Arbeitsabstand ist üblicherweise definiert als der Abstand der vorderen Begrenzung eines Systems (hier der Optik) zum Objekt.

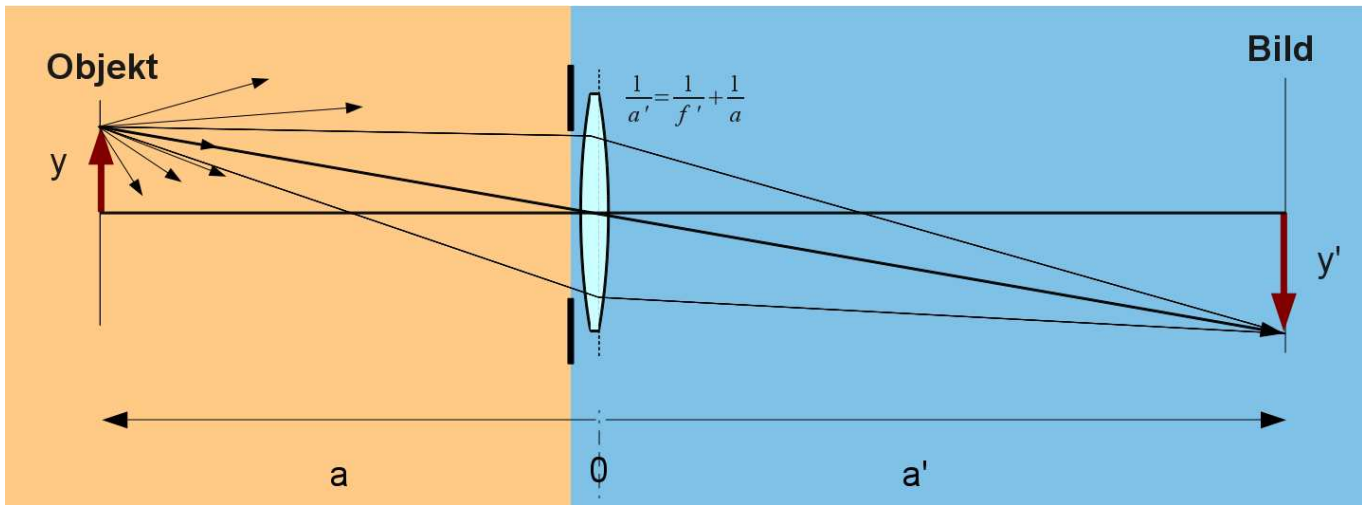


Abbildung 2.1.2: Die Linse bzw. das Linsensystem biegt die Strahlen so um, dass sie im selben Bildpunkt konvergieren. Dazu müssen Objekt-, Bild- und Brennweite gemäß der Abbildungsgleichung miteinander verbunden sein.

Beachten Sie bereits hier unbedingt die Definition des Koordinatensystems bzw. der Vorzeichen. Das Zentrum des Koordinatensystems liegt in der Linsenebene. Das heißt in Abb. 2.1.1 ist a eine negative Größe, während a' positiv ist. Dementsprechend ist der Abbildungsmaßstab β' negativ und in der Tat steht das Bild „auf dem Kopf“, ist also invertiert. Wir werden diese Vorzeichenkonvention im gesamten Buch verwenden und alle Formeln basieren auf dieser Konvention.³

Aus Gründen der Lichteffizienz (durch das Loch der Lochkamera kann nur sehr wenig Licht dringen) verwenden nahezu alle Abbildungssysteme, sowohl biologische (z.B. Auge) als auch technische Systeme (z.B. Mikroskop), eine Linse bzw. ein Linsensystem anstatt des Lochs. Die Linse sorgt letztlich dafür, dass auch Lichtstrahlen, die nicht durch das Loch der Lochkamera laufen, so umgelenkt werden, dass sie an derselben Position in der Bildebene auftreffen. Das funktioniert aber nur für *eine* Kombination aus Objektweite a und Bildweite a' . Diese Kombination an konkreten Abständen hängt mit einem, um nicht zu sagen *dem* elementaren Linsenparameter, der sogenannten **Brennweite** f' über eine weitere Gleichung, die sogenannte **Abbildungsgleichung** zusammen:

³Vereinzelt findet sich in der Bildverarbeitungsliteratur auch eine Darstellung von Formeln basierend auf anderen Vorzeichendefinitionen. Beachten Sie dies !

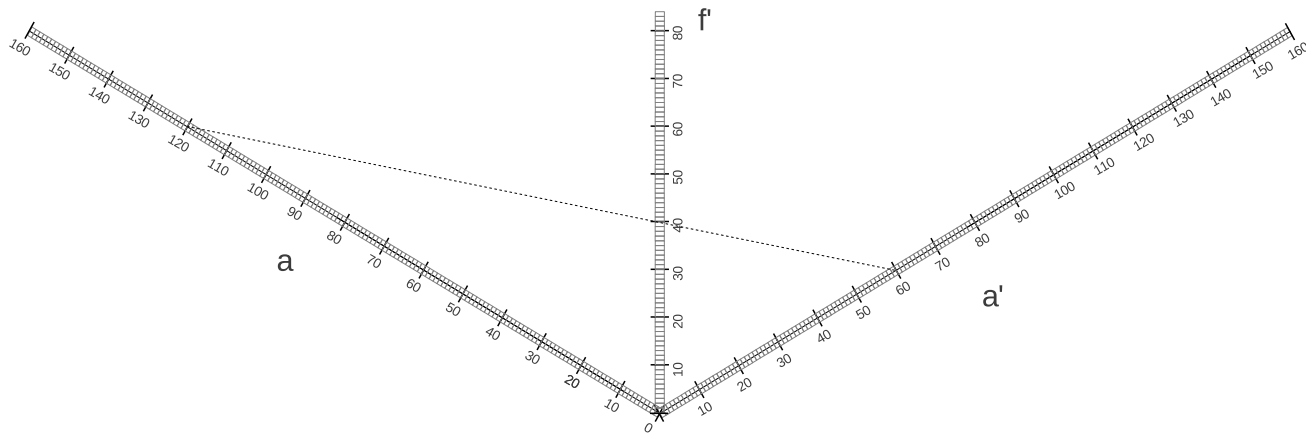


Abbildung 2.1.3: Gaußsches Nomogramm zur grafischen Lösung der Abbildungsgleichung 2.2. Im eingezeichneten Beispiel wird die Brennweite einer Abbildungslinse für die Objektweite -120 mm und die Bildweite 60 mm gesucht. Es ergibt sich $f' = 40$ mm. Die Einheiten sind beliebig und sie können die Achsen beliebig skalieren, d.h. für eine Objektweite von -600 mm und eine Bildweite von 300 mm ergibt sich eine Brennweite von 200 mm.

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{a} \quad (2.2)$$

Beachten Sie bei der Anwendung unbedingt wieder die korrekten Vorzeichen, da ansonsten völlig falsche Werte bei Anwendung der Formel resultieren. Die Brennweite ist hier die “bildseitige” Brennweite und wird daher — als Größe im Bildraum — mit einem Strich gekennzeichnet. Wenn man (etwas lax) von der “Brennweite” eines optischen Systems spricht ist meist diese bildseitige Brennweite gemeint.

Falls Sie eine grafische Bestimmung bevorzugen können Sie Gleichung 2.2 anhand des Gaußschen Nomogramms lösen. Verbinden Sie hier zu einfach zwei der drei Größen a , a' , f' durch eine Gerade und lesen Sie die dritte Größe ab (siehe Abb. 2.1.3).

Typischerweise gehen Sie für eine Grundausslegung der Abbildung folgendermaßen vor:

1. Sie berechnen den gewünschten Abbildungsmaßstab β' anhand der Aufgabengeometrie (meist eben das Verhältnis aus Bildaufnehmergröße zur maximalen Größe des Objekts)

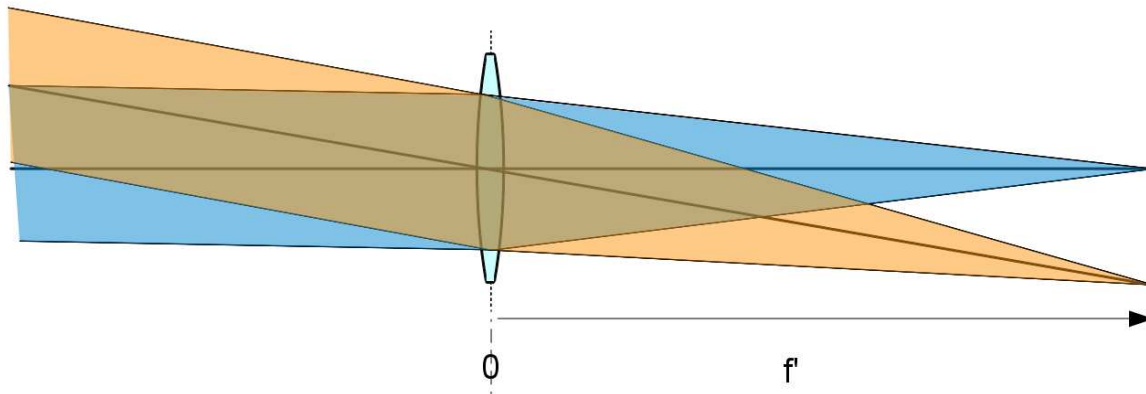


Abbildung 2.1.4: Parallel einfallendes Licht wird in der Brennebene gebündelt. Der Abstand der Brennebene von der Optik (genauer, der bildseitigen Hauptebene der Optik) wird Brennweite genannt. Für Objekte, die weit entfernt sind ist die Bildweite näherungsweise die Brennweite, also $a' \approx f'$.

2. Falls die Objektweite (bzw. der Arbeitsabstand) gegeben ist können Sie mit Gl. 2.1 die Bildweite a' berechnen.
3. Aus a' und a berechnen Sie dann dann die benötigte Brennweite des optischen Systems.

Beispielhaft wollen wir die Abbildung eines 100 mm großen Maschinenteils auf einen Bildaufnehmer mit einer Kantenlänge von 10 mm betrachten. Offensichtlich ist der Abbildungsmaßstab $\beta' = -10 \text{ mm} / 100 \text{ mm} = -0.1$. Bei einem gewünschten Arbeitsabstand von -500 mm ergibt sich die Bildweite $a' = \beta' \cdot a = 50 \text{ mm}$. Mit Gl. 2.2 können wir dann die Brennweite des benötigten optischen Systems direkt zu $f' = 45.5 \text{ mm}$ berechnen.

Es fällt auf, dass die Brennweite f' sehr nah bei der Bildweite a' liegt. Dies ist kein Zufall. Wenn die Objektweite a groß gegen die Bildweite a' ist, dann kann man für Übersichtsrechnungen einfach die Brennweite mit der Bildweite gleichsetzen. Je weiter das Objekt entfernt ist, desto besser ist diese Näherung (Grenzfall: Objekt im Unendlichen). Das ist übrigens auch die Definition der Brennweite: Parallel (also aus unendlicher Entfernung kommendes) einfallendes Licht wird im Abstand der Brennweite fokussiert. Die entsprechende Ebene wird auch (bildseitige) *Brennebene* genannt, vgl. Abb. 2.1.4.

Je nachdem, was bei einer konkreten Aufgabenstellung gegeben ist, kann man so durch einfaches Umformen bzw. Einsetzen der Gleichung 2.1 immer eine erste

Grundausslegung der Optik vornehmen. Letztlich haben wir so die Geometrie der Abbildung und die Brennweite des Abbildungssystems festgelegt.

Die bisher dünn angenommene bzw. dargestellte Linse ist in der Praxis meist eine Kombination aus mehreren Linsen bzw. ein “Objektiv” denn mit einer einzelnen Linse können wir ausgedehnte Objekte nur mit sehr schlechter Qualität abbilden. Dieses Objektiv können wir aber in erster Näherung sehr gut als eine Einzellinse betrachten (vgl. Abschnitt 2.2).

Bei gegebener Brennweite eines Optik und gewünschtem Abbildungsmaßstab kann man mittels

$$a = f'(1 - \frac{1}{\beta'}) \quad (2.3)$$

auch direkt die Objektweite bestimmen.

Beispiel: Berechnen Sie die Objektweite für eine Anwendung mit Abbildungsmaßstab -0.1 und einer Objektivbrennweite von 100 mm.

Lösung: $a = 100 \text{ mm} (1 + 10) = 1100 \text{ mm}$

Beispiel: Sie sollen ein Inspektionssysteme für Zahnräder mit einem Durchmesser von 100 mm auf einen 1/3 Zoll Bildsensor mit 1000 Pixeln abbilden (vertikale Ausdehnung: 3.6 mm). Der Arbeitsabstand soll 0.5 m betragen. a) Berechnen Sie den Abbildungsmaßstab. b) Berechnen Sie die Brennweite der Abbildungsoptik.

Lösung: Der Abbildungsmaßstab ergibt sich direkt zu $\beta' = y'/y = -36 \cdot 10^{-3} a$. Daraus können wir wegen $\beta' = \frac{a'}{a}$ mit $a = -0.5 \text{ m}$ die Bildweite berechnen. Es ergibt sich $a' = 18 \text{ mm}$. Und damit über die Abbildungsgleichung die Brennweite $f' = 17.37 \text{ mm}$.

Wir sind bislang davon ausgegangen, dass das Objekt in einer klar definierten Objektebene liegt. Wenn das Objekt eine gewisse Tiefenausdehnung hat oder in verschiedenen Abständen liegen kann, ergibt sich nur für eine Ebene eine ideal scharfe Abbildung (vgl. Abschnitte 5 und 2.3). Bei einer Verschiebung um Δz im Objektraum ist eine Verschiebung um $\Delta z' = \beta'^2 \Delta z$ im Bildraum vorzunehmen, um wieder ein scharfes Bild zu erhalten (Nachfokussierung).

Optische Abbildungen sind also nicht “volumentreu” und sie müssen den Zusammenhang eben bei einer etwaigen Nachfokussierung beachten. Beachten Sie, dass dieser “Tiefenabbildungsmaßstab” in keiner Form gleichbedeutend mit der Schärfentiefe (vgl. Abschnitt 2.4) ist sondern lediglich die Lage der perfekten Bildpunkte im dreidimensionalen Raum beschreibt.

Beispiel: Sie bilden ein Objekt mit einem Durchmesser von 1 m auf einen 1/3 Zoll Sensor (vertikale Sensorausdehnung: 3.6 mm) ab. Die Schärfentiefe ist begrenzt aufgrund der geringen Blendenzahl. Gegenüber der ursprünglichen Objektposition wird nun das Objekt um 100 verschoben. Um wieviel müssen Sie den Bildsensor nachfokussieren?

Lösung: $|\beta'| = 3.6/1000 = 0.0036$ und damit $\Delta z' = 1.3 \mu\text{m}$.

2.2 Abbildung mit zwei Linsengruppen

Wie bereits angedeutet werden die bisher berechneten “Linsen” in der Praxis Linsenkombinationen bzw. Objektive sein denn mit einer einzelnen Linse kann über ein ausgedehntes Bildfeld meist nur eine vergleichsweise schlechte Auflösung erzielt werden.

Was ist aber bei einem entsprechenden Linsensystem die Bezugsebene von der z.B. die Objektweite oder auch die Brennweite anzugeben bzw. zu berechnen sind? Letztlich sind zwei Bezugsebenen, die sogenannten *Hauptebenen*, notwendig. Man denkt sich das komplexe optische Systeme mit den vielen Flächen, an denen Lichtbrechung stattfindet, ersetzt durch zwei einzelne Ebenen, an denen die gesamte Brechung stattfinden soll. Das ist natürlich eine extreme Näherung, sie ist aber für die Auslegung 1. Ordnung eines Systems absolut ausreichend.

Abbildung 2.2.5 zeigt die bildseitige Hauptebene für ein Abbildungsobjektiv. Parallel einfallende Strahlen werden in Richtung des zugehörigen Bildpunkts gelenkt und treffen sich dort. Wir greifen einen der Strahlen heraus und verlängern in sowohl objektseitig als auch bildseitig (beide Strahlverlängerungen) sind rot dargestellt. Dort wo sich beide schneiden können wir vom Ort der

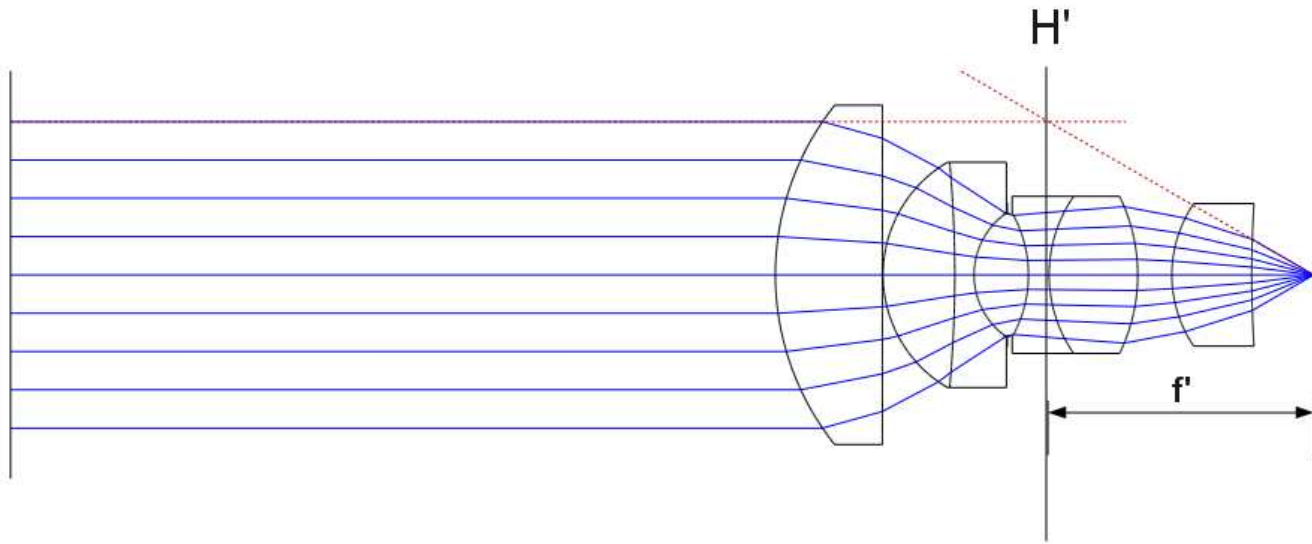


Abbildung 2.2.5: Hauptebenen sind Orte "äquivalenter Brechung", d.h. die vielen Brechungen des Lichts innerhalb eines komplexen optischen Systems werden durch eine einzelne virtuelle Brechung bzw. Strahlumlenkung an einer Ebene ersetzt. Hier dargestellt ist die Konstruktion zur Ermittlung der bildseitigen Hauptebene H' .

äquivalenten Brechung reden, d.h. der einfallende Strahl wird nun nicht mehr an den vielen realen Linsenoberflächen gebrochen sondern nur einmal, an dem Kreuzungspunkt von einfallendem und dem Richtung Bildebene laufenden Strahl. Dieser Punkt ist ein Punkt der bildseitigen Hauptebene. Genauso können wir auch die objektseitige Hauptebene grafisch konstruieren indem wir von parallelem Licht auf der Bildseite ausgehen.

Auf die Berechnung der Position dieser Ebenen wollen wir hier nicht näher eingehen (siehe z.B. [8]), für kommerzielle Objektive ist die Lage der Ebenen in den Datenblättern (teilweise) angegeben.

Für die Anwendung in der industriellen Bildverarbeitung ist es zunächst ausreichend zu wissen, dass die objektseitigen Abstände, also eben die Objektweite, von der objektseitigen Hauptebene aus gemessen werden und die bildseitigen Größen, also z.B. die bildseitige Brennweite f' und die Bildweite von der bildseitigen Hauptebene aus angegeben werden. Die dünne Linse spaltet gedanklich also in eine Box auf, die durch die objektseitige und die bildseitige Hauptebene begrenzt wird (s. Abb. 2.2.5). Der Strahlverlauf zwischen den beiden Hauptebenen ist parallel zur optischen Achse (siehe Abb. 2.2.6).

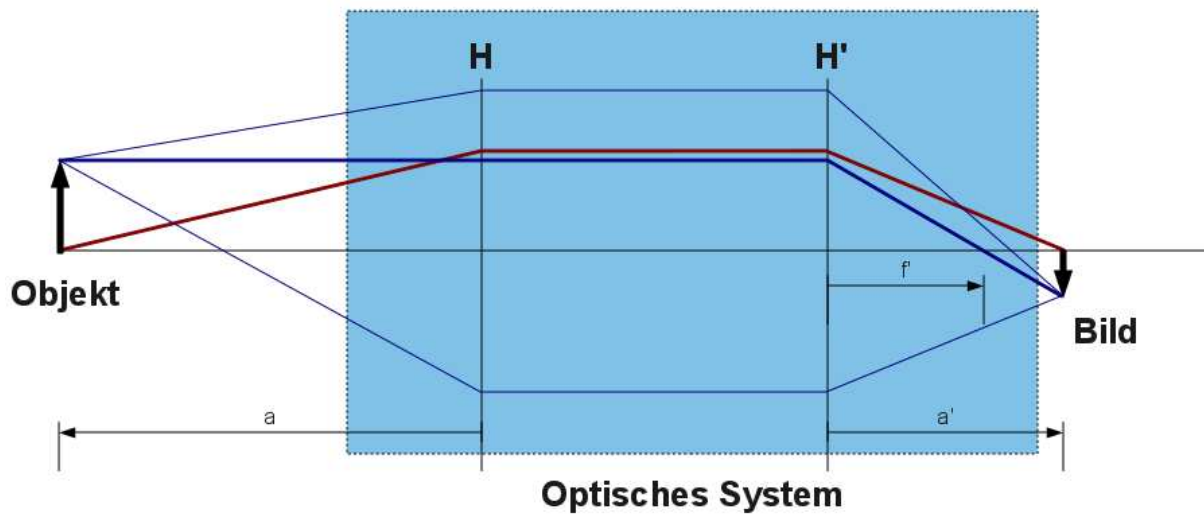


Abbildung 2.2.6: Wenn die beiden Hauptebenen eines Systems bekannt sind, dann kann der paraxiale Strahlverlauf zu und von der Optik konstruiert werden. Objekt-, Bild- und Brennweite sind von den Hauptebenen aus zu messen.

Ganz generell kann man für zusammengesetzte Systeme die Brennweiten und Hauptebenenpositionen aus den entsprechenden Größen der Einzelsysteme berechnen. Dies soll uns aber hier im allgemeinen nicht interessieren (siehe z.B. [9]). Wir wollen stattdessen im folgenden zwei zusammengesetzte optische Systemgeometrie, die in der industriellen Bildverarbeitung oft eingesetzt werden, besprechen. Das Teleobjektiv und das Teleskop.

Das *Teleobjektiv* dient dazu, einen vergleichsweise großen Abbildungsmaßstab auch bei kurzer Baulänge des optischen Systems (inklusive Bildaufnehmer) zu erreichen. Wenn bei einer konventionellen Linse ein großer Arbeitsabstand in Zusammenhang mit einem relativ großen Abbildungsmaßstab erzielt werden soll, dann sind aufgrund von Gleichung 2.1 auch die Bildweite a' und wegen Gleichung 2.2 die Brennweite groß. Eine Verkürzung ergibt sich aber, wenn die bildseitige Hauptebene künstlich in Richtung des Objekts verschoben wird, denn sowohl bildseitige Brennweite als auch Bildweite sind von dieser Ebene aus zu messen. Erreicht wird dies durch den Einsatz einer negativen Linse (Brennweite $f' < 0$) vor der Bildebene.

In verschiedenen Abwandlungen werden oft sogenannte afokale Systeme bzw. Teleskope zur Abbildung eingesetzt. Die typische Anordnung ist das *Kepler-*

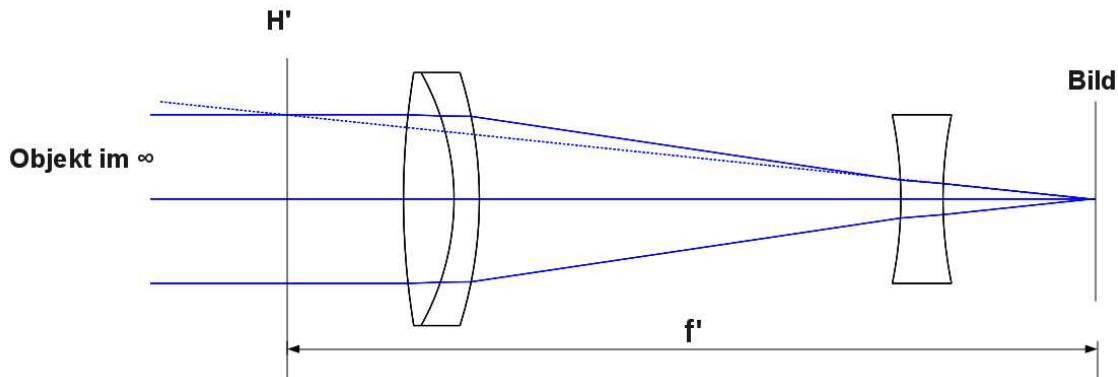


Abbildung 2.2.7: Teleobjektiv: Die Brennweite wird länger als die Baulänge des Objektivs. Erreicht wird dies durch eine Zerstreuungslinse (negative Brennweite f') vor der Bildebene, denn diese verschiebt die bildseitige Hauptebene vor die erste Linsengruppe.

Teleskop. Umgangssprachlich wird mit “Teleskop” ein System verbunden, das weit entfernte Objekte vergrößert darstellt. In der Tat ist so eine Vergrößerung für das menschliche Sehen mit dem Kepler-Teleskop möglich. Für die industrielle Bildverarbeitung ist aber die Anwendung zur Abbildung naher Objekte wichtiger. Abb. 2.2.8 zeigt die grundsätzliche Geometrie. Eine erste Linse bzw. Linsengruppe liegt im Abstand der Brennweite vom Objekt. Dadurch wird ein Bild des Objekts ins Unendliche projiziert. Die zweite Linsengruppe bildet dieses Zwischenbild aus dem Unendlichen wieder in die Brennebene ab. Als Abbildungsmaßstab erhält man wieder mit dem Strahlensatz

$$\beta' = -\frac{f_2}{f_1} \quad (2.4)$$

Der Einsatz eines solchen Systems hat diverse Vorteile. Es kann auf vergleichsweise preisgünstige und einfache Art und Weise ein doppelt-telezentrisches System realisiert werden (vgl. Abschnitt 2.5), indem man den Abstand d zwischen beiden Linsengruppen gerade gleich der Summe der Brennweiten wählt, also $d = f_1 + f_2$, und an der Position der Brennweitenkreuzung die Systemblende des optischen Systems einbringt. Nur wenn der Abstand entsprechend gewählt wird, spricht man im engeren Sinn von einem Teleskop denn nur dann kann man das System auch zur Vergrößerung weit entfernter Objekte einsetzen. Außerdem ergibt die Anordnung mit zwei Objektiven letztlich eine um den Faktor 2 vergrößerte numerische Apertur.

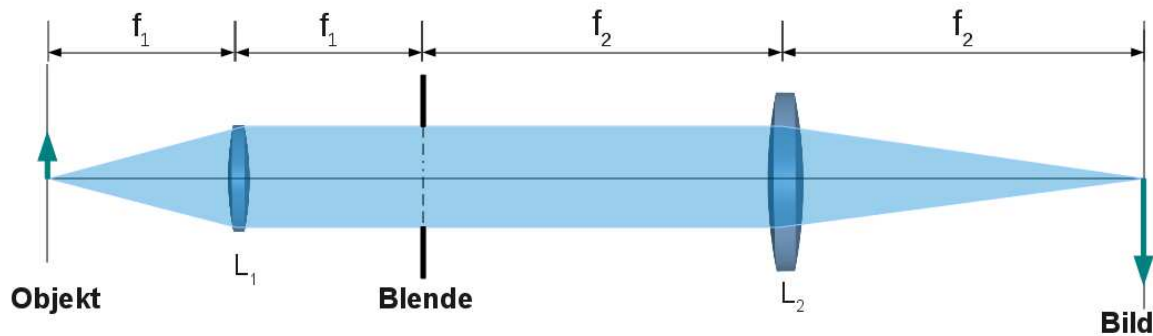


Abbildung 2.2.8: Telezentrische Abbildung durch ein Kepler Teleskop. Die Anordnung eignet sich sehr gut (wenn genügend Bauraum zur Verfügung steht), um mit zwei Standardobjektiven (beide auf unendlich korrigiert) eine gute bis sehr gute Abbildungsqualität zu erreichen. Diese Form der Abbildung ist außerdem die Grundgeometrie moderner Mikroskope. Dabei wird dann die erste Linse "Mikroskopobjektiv" und die zweite Linse "Tubuslinse" genannt.

Beispiel: Sie wollen ein telezentrisches System mit $\beta' = -0.1$ aufbauen. Für die zweite Linse soll eine verhältnismäßig kurze Brennweite eingesetzt werden, um die Baulänge gering zu halten. Sie wählen $f_2 = 10$ und damit ergibt sich direkt $f_1 = 100$ mm.

Moderne Mikroskope nutzen letztlich dieselbe Grundanordnung bei der die Brennweite der ersten Linse, des sogenannten Mikroskopobjektivs, sehr kurz gewählt ist (z.B. 2 mm) und die Brennweite der zweiten Linse, der sogenannten Tubuslinse eher lang ist (z.B. 180 mm). Dementsprechend ergibt sich ein großer Abbildungsmaßstab.

2.3 Blende und Pupille

Die Ausdehnung des Lichtkegels, den wir von einem Objektpunkt erfassen ist einer der wichtigsten Parameter eines optischen Systems. Viele wichtigen Größen werden dadurch (indirekt) spezifiziert. Diese Ausdehnung können wir durch die Wahl des Durchmessers der Blende (genauer *Aperturblende*) des optischen Systems variieren. Dadurch ändern sich in charakteristischer Weise

- Aberrationen und Auflösung
- Lichtstärke
- Schärfentiefe

der Abbildung.

Die *Blende* ist dabei diejenige Komponente, die den von einem auf der Achse liegenden Punkt ausgehenden Lichtkegel am stärksten limitiert (siehe Abb. 2.3.9).⁴

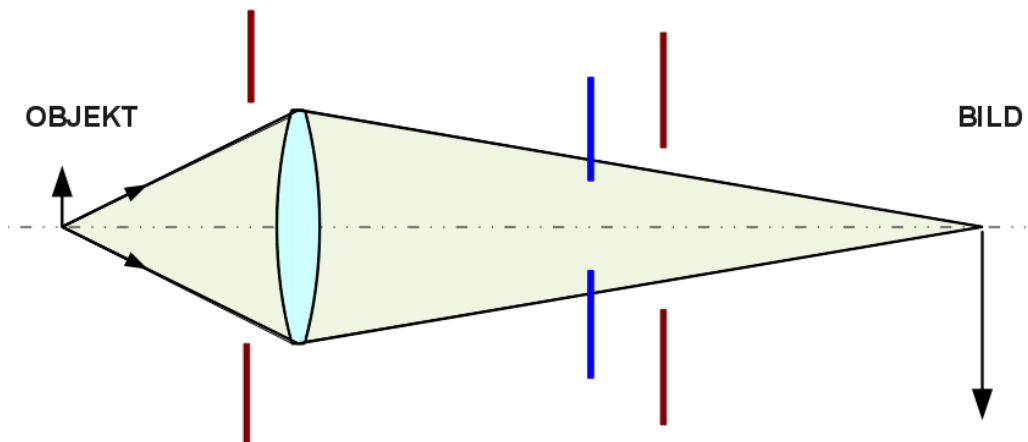
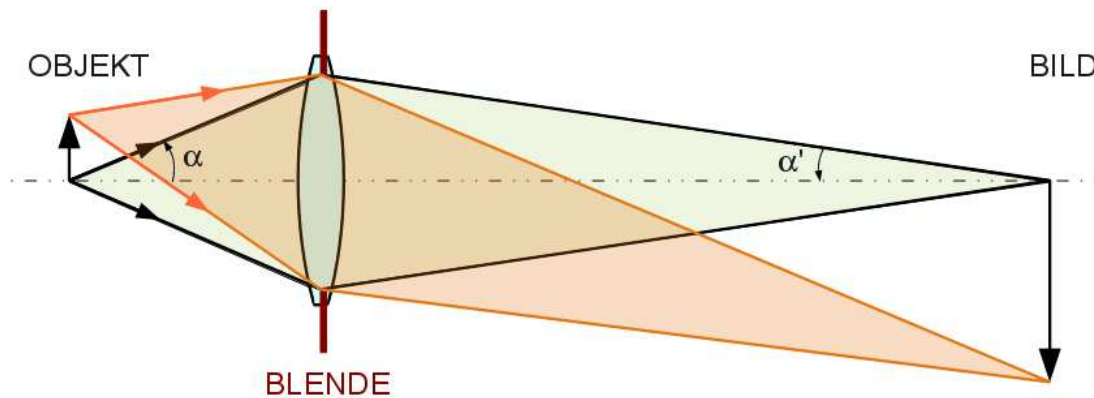


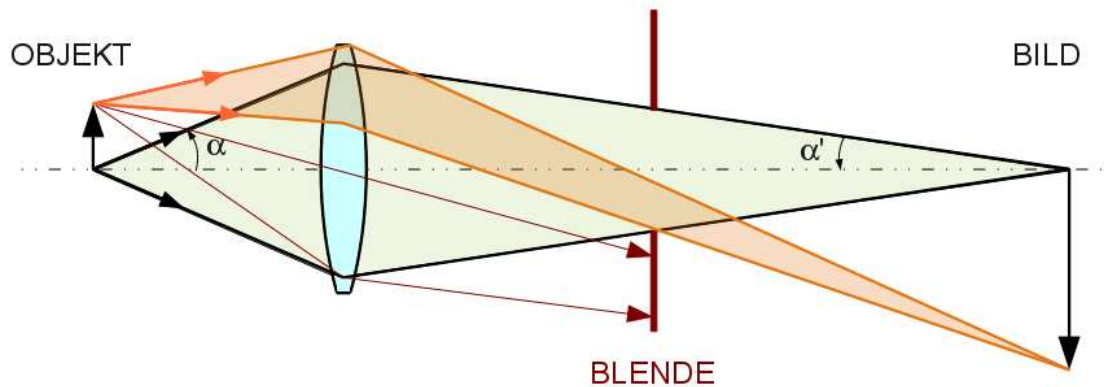
Abbildung 2.3.9: Eine Komponente limitiert den von einem auf der Achse liegenden Punkt ausgehenden Lichtkegel, der durch die Optik verarbeitet wird am stärksten (hier blau eingezeichnet). Diese Komponente ist die "Blende" bzw. Aperturblende des Systems. Spezifiziert wird sie meist durch die Blendenzahl oder die numerische Apertur. Die Lichtkegellimitierung ist essentiell für die beugungsbedingte Auflösungsbegrenzung, die Schärfentiefe und die Lichteffizienz der Abbildung.

⁴Der Begriff "Blende" ist in diesem Zusammenhang üblich, aber etwas ungenau denn Blende ist an sich der Überbegriff für verschiedene Blenden. Hier gemeint ist die Aperturblende. Es gibt aber auch Feldblenden, die das Objekt- bzw. Bildfeld begrenzen und Streulichtblenden, die Streulichtanteile vermindern. Wir werden — wie in der Bildverarbeitung üblich — im folgenden dennoch den Begriff "Blende" für die Aperturblende verwenden.

Man könnte zunächst meinen, dass die konkrete Lage der Blende uninteressant ist (Abb. 2.3.11). Sobald aber ein ausgedehntes Feld mit mehreren Punkten abgebildet werden soll, ist die Lage sehr wichtig und damit ein wichtiges Designkriterium. Abb. 2.3.10 zeigt für zwei verschiedene Blendenposition bei einer einfachen Abbildung mit einer Einzellinse, dass die Blendenposition sich maßgeblich auf den Lichtkegel unterschiedlicher Feldpunkte auswirkt. Dementsprechend variieren Lichtstärke, Auflösung, Aberrationen und Schärfentiefe mit dem Feld. Der Abfall der Lichtstärke mit dem Feld wird dabei als *Vignettierung* bezeichnet.



(a) Blende bei der Linse



(b) Blende hinter Linse

Abbildung 2.3.10: Die Wahl der Blendenposition hat einen Einfluss auf den effektiven Lichtkegel der von jedem Feldpunkt genutzt wird.

Der Raumwinkel, der durch die Optik und den Objektpunkt aufgespannt wird ist entscheidend und zu seiner Beschreibung wird im allgemeinen die sogenannte *numerische Apertur* verwendet. Definiert ist diese in Vakuum (bzw. Luft) als der Sinus des halben Öffnungswinkels des Lichts, also

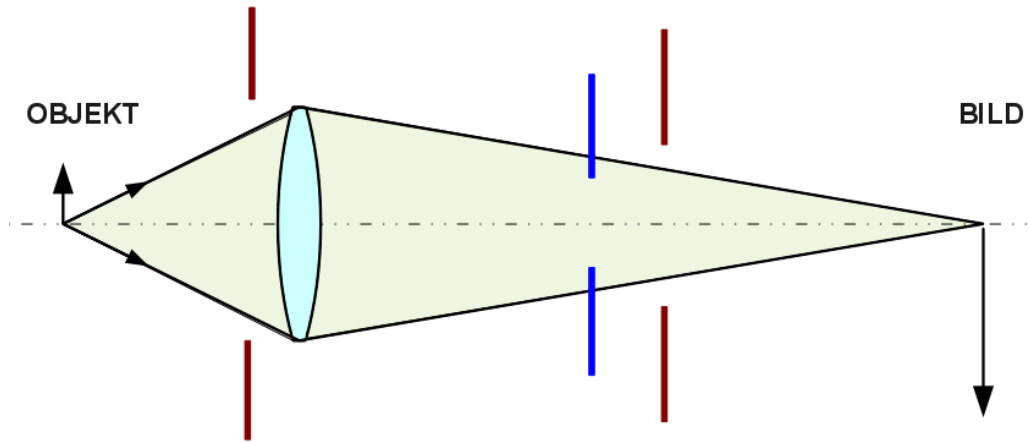


Abbildung 2.3.11: Betrachtet man nur einen auf der optischen Achse liegenden Objektpunkt, so ist die Lage der Blende irrelevant. Alle hier eingezeichneten Blenden haben exakt denselben Effekt.

$$NA = \sin \alpha. \quad (2.5)$$

Diese Winkelangabe kann natürlich genauso im Bildraum erfolgen, also $NA' = \sin \alpha'$. Zwischen der numerischen Apertur NA im Objektraum und im Bildraum NA' gilt wie für alle Winkel der einfache Zusammenhang

$$NA' = \frac{NA}{\beta'} \quad (2.6)$$

2.3.1 Blendenzahl und Pupillen

Die numerische Apertur zur Beschreibung der Öffnung erfasst in allen Situationen den wesentlichen Aspekt der Blende. Als Maßzahl zur Beschreibung der Blende wird in der Fotografie und der Bildverarbeitung aber in aller Regel die **Blendenzahl** K verwendet. K beschreibt für Anwendungen, bei denen das Objekt weit entfernt ist und somit die Bildweite der Brennweite entspricht, die bildseitige numerische Apertur. Definiert ist K für solche Fälle mittels

$$K = \frac{f'}{D}. \quad (2.7)$$

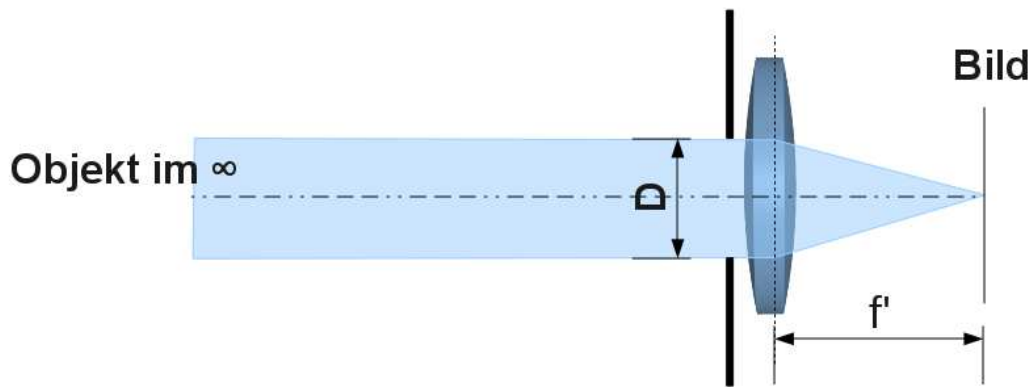


Abbildung 2.3.12: Die Blendenzahl K ist definiert als $K = f'/D$. Diese Definition ist nur sinnvoll für Objekte, die sich (näherungsweise) im Unendlichen befinden. Sie ist ein Maß für den bildseitigen Öffnungswinkel.

f' ist wieder die (bildseitige) Brennweite und D bezeichnet den "Durchmesser der Optik". Natürlich ist hier mit "Durchmesser" der effektiv wirksame, also das Licht sammelnde Durchmesser gemeint. Gedanklich denkt man sich das optische System also als eine Black-Box und der Eingang dieser Box ist die sogenannte *Eintrittspupille* der Optik (Abb. 2.3.13). Das klingt zunächst einfach, ist es aber letztlich nicht, denn die Lage und Größe dieser Eintrittspupille entspricht im allgemeinen nicht irgendeiner realen Komponente des optischen Systems sondern ist eine rein virtuelle Größe.

Für den geometrischen Optiker und den Optikdesigner ist ein vertieftes Verständnis der Pupillen und Blenden von großer Bedeutung. Neben dem Einfluss auf Lichtstärke, beugungsbedingte Auflösung und Schärfentiefe werden durch die Wahl der Blende bzw. der Pupillen auch die Perspektive (vgl. Telezentrie), Vignettierungen und Aberrationen wesentlich beeinflusst.

Für den Praktiker reicht es an dieser Stelle aus, sich klar zu machen, dass

- a) letztlich der Raumwinkel der aufgefangenen oder zum Bildsensor fokussierten Strahlung entscheidend ist und dass wir
- b) in der Mikroskopie diesen Winkel durch die numerische Apertur angeben während
- c) für die meisten anderen Abbildungssysteme ($\beta' < 0.2$) meist die Blendenzahl zur Beschreibung verwendet wird.

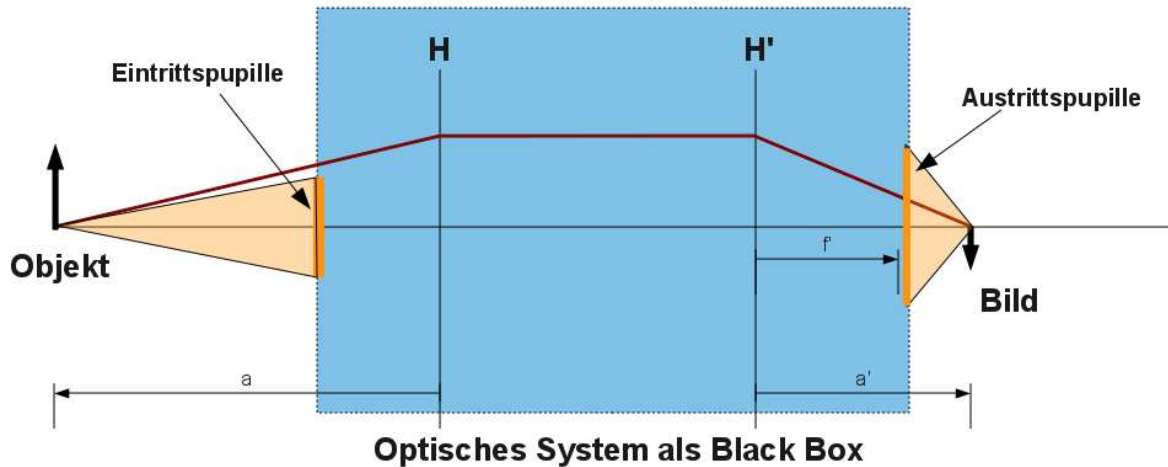


Abbildung 2.3.13: Hinsichtlich der Apertur und damit der vom System akzeptierten Strahlbündel bzw. der aus dem System austretenden Strahlbündel wird das System komplett durch die Eintritts- und die Austrittspupille beschrieben. Dies ist sowohl hinsichtlich des Strahlungsflusses als auch hinsichtlich der Wellenfrontdeformationen (Bildfehler) wesentlich. Man erspart sich so, für alle Betrachtungen das Innenleben des Systems zu analysieren. Beachten Sie: Durch die Hauptebenen wird der Strahlkegel nicht definiert. Beachten Sie außerdem: Die Pupillen können beliebig, also z.B. auch im Unendlichen, liegen.

Der Zusammenhang zwischen bildseitiger numerischer Apertur und Blendenzahl wenn $|a| \gg |a'|$ ist⁵

$$\sin \alpha' = \frac{D}{2 f'} = \frac{1}{2K} \quad (2.8)$$

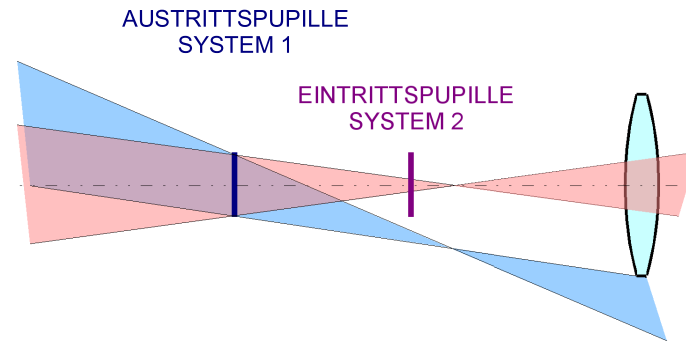
Wird das Objektiv nicht für eine Abbildung aus dem Unendlichen eingesetzt, wird teilweise die "effektive Blendenzahl" angegeben. Es gilt

$$K_{eff} := (1 + \beta')K \approx K \quad (2.9)$$

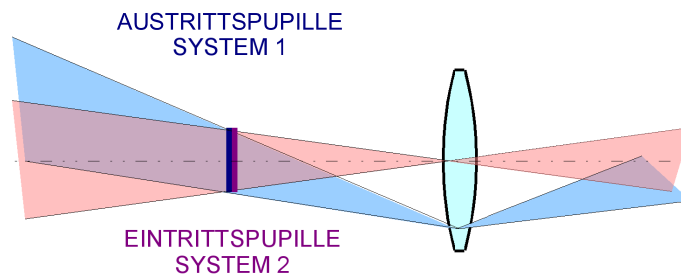
Wenn ein Hintereinanderschalten zweier optischer Teilsysteme ohne Lichtverlust erfolgen soll, ist darauf zu achten, dass die Eintrittspupille des zweiten Systems idealerweise in der Ebene der Austrittspupille des ersten Systems liegt und die Eintrittspupillengröße des nachgeschalteten Systems mindestens so groß wie die

⁵Bei der Betrachtung von Abb. 2.3.12 könnten Sie zunächst auf die Idee kommen, dass damit zwischen dem Winkel α' und der Blendenzahl K ein Zusammenhang gemäß dem Tangens besteht ($\tan \alpha = D/2/f'$) und daraus dann $\sin \alpha$ berechnen. Dies ist ein Trugschluss denn für reale Systeme, die hinsichtlich der Bildfehler korrigiert sind, die Pupillen keine Ebenen sondern Kugeln mit den Objekt- bzw. Bildpunkten als Kugelmittelpunkt sind

Austrittspupille des ersten Systems ist (Abb. 2.3.14). So lässt sich ein Verlust an Licht und Information (Auflösung) vermeiden.



(a) Die Eintrittspupille von System 2 fällt nicht in die Austrittspupille von System 1. Es ergibt sich Vignettierung.

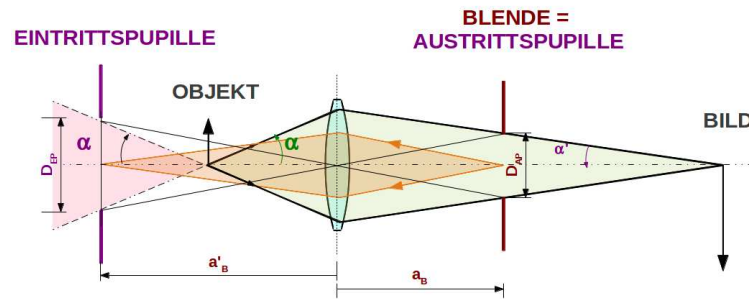


(b) Wenn beide Pupillen aufeinander fallen und dieselbe Größe aufweisen wird Vignettierung vermieden.

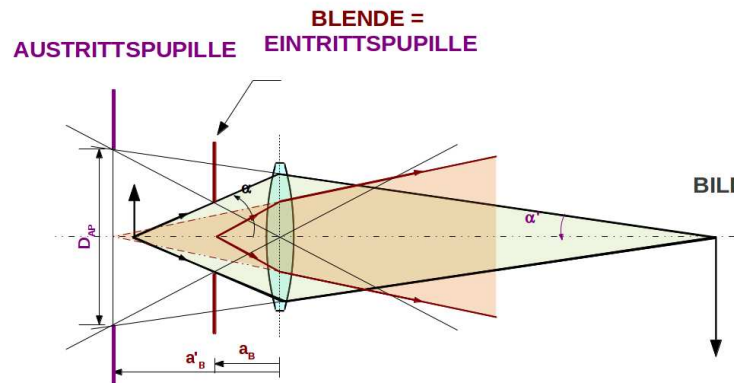
Abbildung 2.3.14: Bei der Kombination von Systemen sollten die Pupillen der beiden Systeme aufeinander fallen.

Es kann also wichtig sein, die Position und Größen der Pupillen von optischen Systemen zu berechnen. Letztlich ist dies vergleichsweise einfach möglich wenn der Aufbau der Optik bekannt ist. Die Eintrittspupille ist das Bild der Blende des Systems durch die optischen Komponenten, die *vor* der Blende liegen (vgl. Abb. 2.3.15). Wenn Sie in eine Optik mit dem bloßen Auge schauen, dann sehen Sie genau diese Eintrittspupille. In der Ebene der Eintrittspupille ergibt sich also ein scharfes Bild der Systemblende und die Größe des Bildes ist eben genau die Größe der Eintrittspupille.

Ganz entsprechend ist die Austrittspupille das Bild der Systemblende durch die Optik, die *nach* Blende liegt und Sie können diese Austrittspupille sehen, wenn Sie von der anderen Seite her kommend in die Optik schauen.



(a) Eintrittspupille



(b) Austrittspupille

Abbildung 2.3.15: Berechnung der Pupillen. Die Eintrittspupille ist das Bild der Aperturblende durch die vor der Aperturblende liegende Optik. Entsprechend ist die Austrittspupille das Bild der Aperturblende durch die nach der Aperturblende liegende Optik.

2.4 Schärfentiefe

Natürlich führt eine eng zugezogene Blende (entspricht großer Blendenzahl K) nur einer geringen Lichteffizienz. Vom Objekt ausgehendes Licht wird nur wenig genutzt. Wenn dies der einzige Einfluss der Blende wäre dann würde man fast immer eine stark geöffnete Blende verwenden.

Eine große Öffnung bedeutet neben dem Vorteil der Lichtnutzung aber auch eine Verringerung der Schärfentiefe der Abbildung sowie meist auch eine Verringerung der praktisch erzielten Auflösung durch Vergrößerung der Bildfehler. Auf die starke Zunahme der Bildfehler, die mit einer Zunahme der Öffnung einhergehen, werden wir in Abschnitt 5.2 ausführlich eingehen.

Dass die Schärfentiefe durch eine Vergrößerung der Blende verringert wird, ist unmittelbar aus Abb. 2.4.16 einsichtig. Eine einfache geometrische Analyse zeigt (siehe z.B. [9]), dass bei einer Scharfstellung auf die Ebene a Objekte

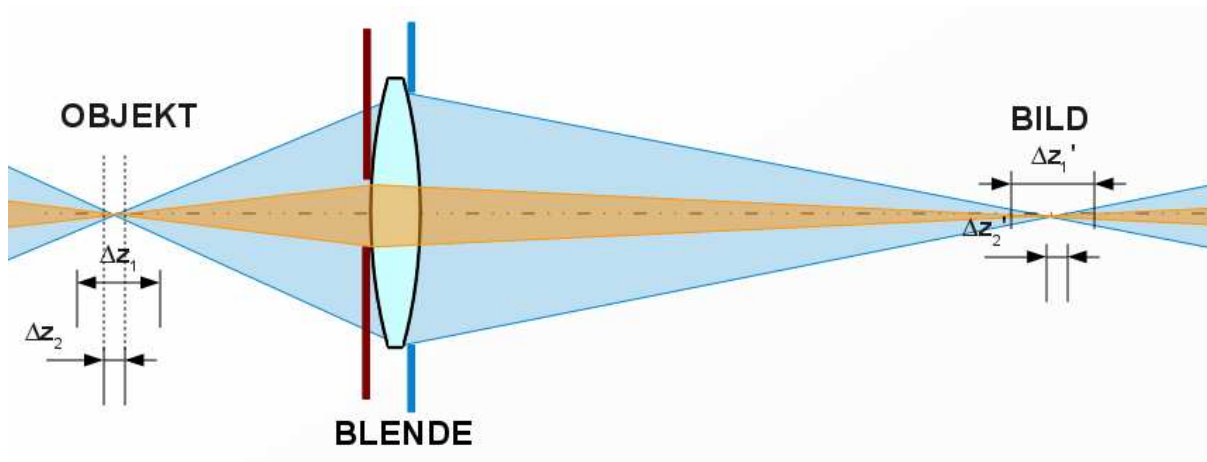


Abbildung 2.4.16: Je kleiner die numerische Apertur bzw. je größer die Blendenzahl (roter Strahlkegel), desto größer ist der Schärfentiefenbereich der noch zu einer akzeptablen Unschärfe (Unschärfescheibchen B') führt (Δz_2). Die Schärfentiefe kann sowohl im Objektraum als auch im Bildraum angegeben werden. Die Beziehung zwischen beiden Größen ist durch $\Delta z' = \beta'^2 \Delta z$ gegeben.

im Bereich zwischen a_v und a_h scharf abgebildet werden. Der (geometrische) Schärfentiefenbereich δz ist näherungsweise

$$\delta z \approx 2K B' / \beta'^2 \quad (2.10)$$

Dabei bezeichnet B' den erlaubten Durchmesser des (defokussierten) Bildes eines idealen Objektpunkts.

Für hohe numerische Aperturen ist dieser rein geometrische Wert allerdings wenig geeignet. Wenn man von einer maximalen Wellenfrontdeformation (Peak-to-Valley) aufgrund der Defokussierung (vgl. Kapitel 5.2) von $\lambda/4$ ausgeht, ergibt sich ein (wellenoptischer) Schärfentiefenbereich von

$$\delta z' = \frac{\lambda}{2NA'^2} \quad (2.11)$$

Beispiel: Berechnen Sie die Schärfentiefe für ein Abbildungssystem mit $\beta' = -0.1$ bei einer Blendenzahl von 5. Der erlaubte Durchmesser des defokussierten Punktbildes soll 2 Pixel ($10 \mu\text{m}$) betragen.

Lösung: $\delta z = 2 \cdot 5 \cdot 0.01 / 0.01 = 10 \text{ mm}$

Wir können auch die Nah- und Ferndistanz, bei der noch ein ausreichend scharfes Bild erzielt wird berechnen.

Mit $\beta' = -0.1 = a'/a \approx f'/a = f'/1\text{ m}$ ergibt sich $f' = 100\text{ mm}$. Mit $K=5$ folgt $D_{EP} = 20\text{ mm}$ und damit $a_1 = 1.005\text{ m}$ und $a_2 = 0.995\text{ m}$ und somit wie erwartet wieder ein Schärfentiefenbereich von 10 mm .

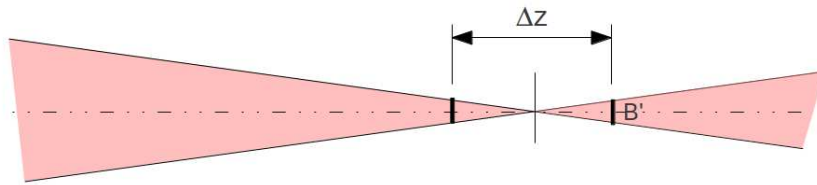


Abbildung 2.4.17: Der Schärfentiefenbereich ist linear abhängig vom erlaubten Unschärfekreisdurchmesser B' und der numerischen Apertur.

Insbesondere das Auge nutzt die Möglichkeit der vergrößerten Schärfentiefe durch Abblenden: Wenn wir Objekte sehr nah (und damit groß) betrachten, dann wird unsere Pupille, die die Blende des Auges ist, verkleinert. Dadurch wird der Schärfentiefenbereich der Abbildung vergrößert und wir können das zu betrachtende Objekt noch näher an das Auge bringen und es somit noch größer (es gilt ja $\beta' = a'/a$) betrachten.

Für die praktische Bestimmung der Schärfentiefe gibt es normierte keilförmige Objekt⁶ mit feiner Strukturierung, die es erlauben die Schärfentiefe sehr exakt messen zu können.

⁶z.B. bei Edmund Scientific erhältlich

2.5 Perspektive

Für die industrielle Anwendung hat die dargestellte einfache Abbildung oftmals einen gewissen Mangel. Nach Gleichung 2.1 ändert sich bei einer axialen Verschiebung ($a \rightarrow \tilde{a}$) nämlich leider — abgesehen von der Bildschärfenproblematik — auch der Abbildungsmaßstab β' . Wenn also aus dem Bild eine geometrische Größe bestimmt werden soll, dann führt eine axiale Verschiebung des Objekts typischerweise zu einem Messfehler dieser Bestimmung (siehe Abb. 2.5.18).

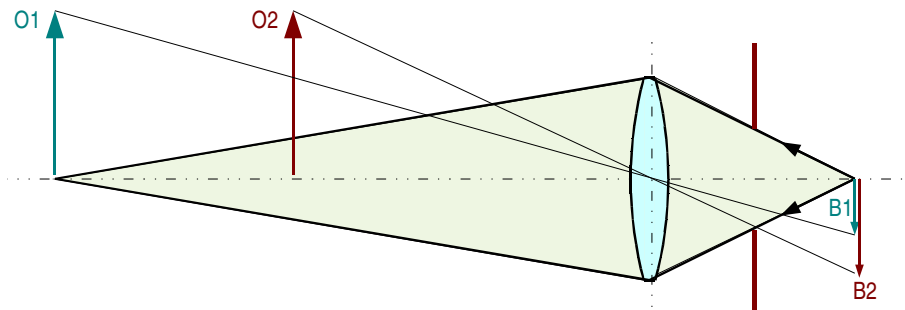


Abbildung 2.5.18: In aller Regel bilden optische Systeme gemäß der Zentralperspektive eine dreidimensionale Szene ab. Insbesondere werden weit entfernte Objekte mit einem geringeren Abbildungsmaßstab abgebildet und haben so ein entsprechend kleines Bild.

Die Tatsache, dass bei (konventionellen) Abbildungen weit entfernte ($|a|$ groß) Objekte stark verkleinert werden ist für uns insgesamt betrachtet eher Segen als Fluch denn wir sind so in der Lage, gleichzeitig eine große, ausgedehnte Szene zu überschauen und nahe Objekte im Detail beurteilen zu können. Für die messende Bildverarbeitung ist die Abstandsabhängigkeit des Abbildungsmaßstabs in aller Regel unerwünscht. Zur Lösung der Problematik wird eine (oder mehrere) der drei folgenden Maßnahmen ergriffen:

- Sicherstellung (Mechanik), dass keine Variation der Objektweite auftritt. Dies ist natürlich nur möglich, wenn das Objekt selbst nicht eine große Tiefenausdehnung aufweist.
- Algorithmische Rückrechnung auf die wahre Objektgröße: Hierzu muss die real vorliegende Entfernung des Objekts in irgendeiner Form gemessen oder geschätzt werden. Durch geeignete vorangegangene Kalibrierung und dann nachfolgenden Ausgleich der Entfernungsabhängigkeit kann wieder auf die reale Objektgröße rückgerechnet werden.

- Einsatz einer Optik mit sogenannter (objektseitiger) telezentrischer Perspektive.

Wir wollen hier auf den letzten dieser Punkte, die telezentrische Perspektive, näher eingehen. Diese Art der Abbildung ist im täglichen Leben zwar unüblich, aber in der industriellen Bildverarbeitung aufgrund der bereits beschriebenen Tiefenvariation des Abbildungsmaßstabs von enormer praktischer Bedeutung. Sofern eine messende Anwendung oder anderweitig komplexe Aufgabenstellung vorliegt und ein Einsatz von telezentrischen Objektiven möglich ist, wird man in aller Regel eben solche Optiken verwenden.

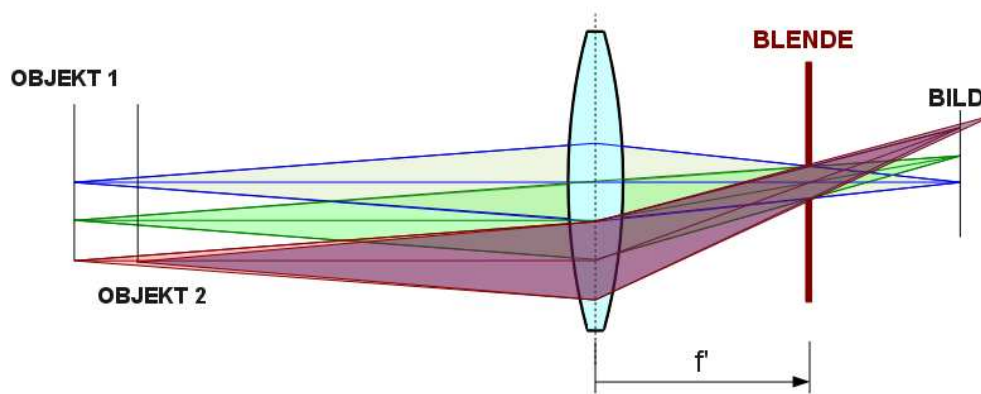


Abbildung 2.5.19: Objektseitig telezentrische Perspektive. Der Schwerpunkt des Strahlenbündels ist der Hauptstrahl. Dieser läuft im Objektraum offensichtlich parallel zur optischen Achse. Eine Verschiebung des Objekts entlang der optischen Achse (violett dargestellt für tiefsten Feldpunkt) ändert am Verlauf des Hauptstrahls nicht. Die Abbildung des entsprechenden Objektpunkts wird zwar unscharf, der Schwerpunkt des unscharf abgebildeten Punkts bleibt aber unverändert. Erreicht wird diese telezentrische Perspektive durch die Position der Blende in der Brennebene des ersten Linsengruppe (bzw. durch Positionierung der Eintrittspupille im Unendlichen).

Abb. 2.5.19 zeigt eine typische objektseitig telezentrische Abbildung. Entscheidend ist die Position der Blende (vgl. Abschnitt 2.3). Bei der telezentrischen Abbildung wird die Blende genau in die Brennebene des Systems gebracht. Der mittlere Strahl durch die Blende läuft daher im Objektraum *parallel* zur optischen Achse. Dieser Strahl ist von besonderem Interesse denn er ist quasi der "Schwerpunkt" (begrifflich genauer: "Schwerstrahl") des Strahlenbündels, das von der Optik aufgefangen wird. Alle anderen Strahlen des Strahlenbündels sind leicht anders geneigt, aber die mittlere Strahlneigung des Strahlenbündels ist eben Null bzw. parallel zur optischen Achse orientiert.

Was passiert nun, wenn das Objekt leicht axial verschoben wird? Natürlich wird die Abbildung unscharf, aber diese leichte Unschärfe muss kein Problem in der Anwendung darstellen, denn trotzdem können z.B. Schwerpunkte von Linien in der Bildebene sehr genau bestimmt werden (Faustregel: auf ca. $1/10$ Pixel genau). Da der Schwerstrahl des Strahlenbündels parallel zur Verschiebung läuft, ändert sich die Position des Auftrefforts des Schwerstrahl in der Bildsensorebene nicht. Nach wie vor wird der Objektpunkt an exakt derselben Position auf dem Bildsensor registriert! Trotz Variation der Entfernung bleibt das Bild also gleich groß, ein für messtechnische Anwendungen oftmals immenser Vorteil.

Da der Schwerstrahl im Objektraum parallel verläuft spricht man von objektseitiger Telezentrie. Entsprechend gibt es auch eine bildseitige Telezentrie, bei der der entsprechende Strahl eben im Bildraum parallel läuft. Dies hat sensorseitig, insbesondere bei Sensoren mit Mikrolinsen (vgl. Abschnitt ??) Vorteile. Hat man gleichzeitig sowohl objekt- wie auch bildseitige Telezentrie spricht man von beidseitiger Telezentrie.

Aus der Konstruktion ergibt sich aber leider auch, dass das abzubildende Objekt kleiner als der Durchmesser der Frontlinse (genauer: Eintrittspupille, vgl. Abschnitt 2.3) sein muss. Dies ist eine erhebliche Einschränkung, denn größere Objekte lassen sich daher leider nur mit großen (und dementsprechend teuren) Objektiven telezentrisch abbilden. Einfach aufgebaute telezentrische Objektive sind im Vergleich zu ihrem Arbeitsabstand (und im Gegensatz zu nicht-telezentrischen Objektiven) vergleichsweise lang.

Aber auch für nicht-messende Aufgaben kann die Telezentrie deutlich vereinfachend wirken. Abb. 2.5.20 zeigt die eine konventionelle sowie eine telezentrischen Perspektive eines Bauteils. Bei Verwendung der telezentrischen Perspektive wird die Szene deutlich einfacher. Es sind weniger Linien zu beachten, die Analyse ist viel weniger anspruchsvoll. Insbesondere ist zu beachten, dass gleiche Objektteile (hier z.B. Schlitze) je nachdem an welcher Position sie liegen, bei konventioneller Perspektive unterschiedlich im Bild erscheinen.

Und selbst wenn das Objekt keine Tiefenausdehnung aufweist werden der Praxis gerne telezentrische Objektive eingesetzt. Zunächst sollte man in diesem Fall keinen Vorteil erwarten. In der Praxis werden telezentrische Objektive aber eben speziell für messende Anwendungen optimiert und haben daher vergleichsweise geringe Verzeichnungen. Die Kalibrierung ist dementsprechend oftmals stark

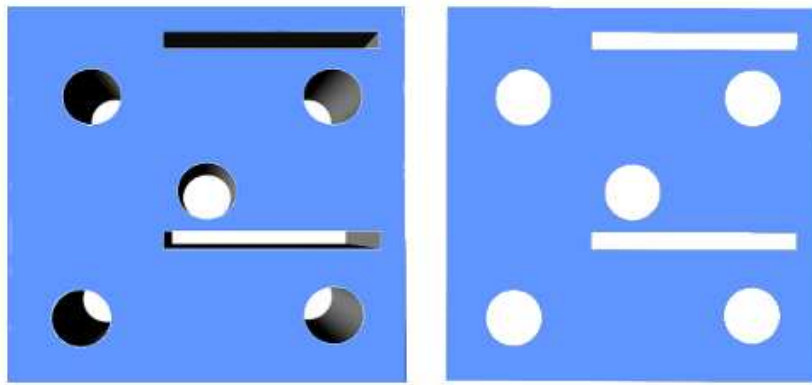


Abbildung 2.5.20: Gegenüberstellung der konventionellen entozentrischen (links) und der telezentrischen (rechts) Abbildung eines Bauteils mit Bohrungen und Schlitten. Die telezentrische Abbildung liefert direkt die Aufsicht im Sinne einer Parallelprojektion und ist deutlich einfacher zu verarbeiten (weniger Kanten, weniger relevante Punkte).

vereinfacht.

Neben der Zentralperspektive (*entozentrische Perspektive* und der telezentrischen Abbildung wird manchmal auch eine *hyperzentrische Abbildung* (bzw. *perizentrische Abbildung*) benötigt. Dies ist dann der Fall wenn man gleichzeitig die Stirnfläche und die parallel oder aufeinander zu laufenden Seitenfläche eines Körpers abbilden will (siehe Abb. 2.5.21), weit entfernte Teile werden also vergrößert dargestellt. Entscheidend ist hierbei, dass die Eintrittspupille aus Sicht der Optik vor oder bei dem Objekt, das abgebildet werden soll, liegt. Allerdings ist die Optik aus rein geometrischen Gründen (vgl. Abb. 2.5.21) deutlich größer als die Objektausdehnung zu wählen und die Abbildung der Seitenwände erfolgt verzerrt).

2.6 Zusammenfassung wesentlicher Parameter

Für die Spezifikation einer Abbildung müssen Sie sich zunächst über einige Grundparameter Ihrer Anwendung und den sich daraus ergebenden Folgen klar werden.

Basierend auf verschiedenen Grundvorstellungen müssen sie in jedem Fall spezifizieren:

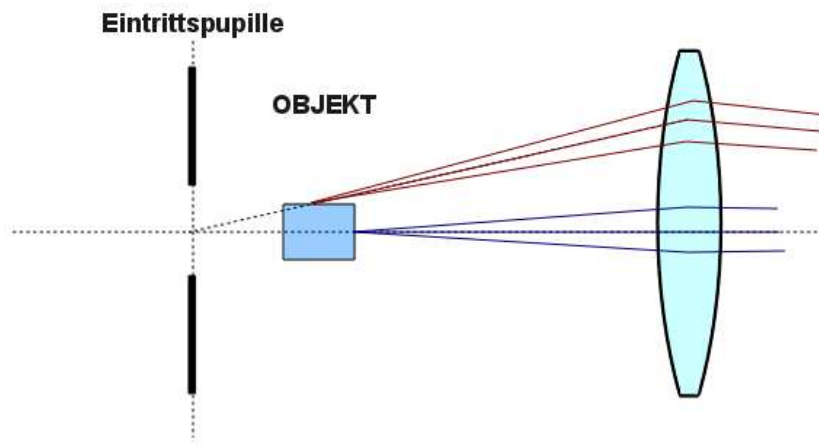


Abbildung 2.5.21: Hyperzentrische Perspektive. Die Eintrittspupille liegt "vor" dem Objekt. Daher können gleichzeitig die Seitenwände (verzerrt) und die Deckfläche abgebildet werden.

Objektfeld bzw. Objektvolumen: Welches Feld muss von der Abbildung erfasst werden und welcher Schärfentiefenbereich ist notwendig?

Objektentfernung (Arbeitsabstand): Gibt es Einschränkungen hinsichtlich des Abstands von Objekt zur Optik?

Bild- bzw. Sensorgröße: Welche Sensorgröße wird angestrebt?

Brennweite: Die Brennweite ist der für uns zunächst wichtigste Parameter der Abbildungsoptik. Für einen sich aus Objektfeld und Bildgröße ergebenden Abbildungsmaßstab und der Objektentfernung kann die Brennweite berechnet werden.

Blendenzahl: Die Blende ist der zweitwichtigste Parameter der Abbildungsoptik. Kleine Blendenzahlen führen zu hohen Schärfentiefen aber auch zu geringer Lichteffizienz. Außerdem hat die Wahl der Blende einen wesentlichen Einfluss auf die Auflösung der Abbildung (vgl. Kapitel 5).

Perspektive: Falls möglich sollte bereits bei der Grundausslegung der Abbildungsgeometrie klar sein, ob eine konventionelle, eine telezentrische oder eine hyperzentrische Abbildung eingesetzt werden soll.

Zusätzliche Anforderungen: Falls zusätzliche, besondere Anforderungen an die Abbildung bestehen (z.B. Zoom, spezielle Wellenlängenbereiche, Farbe, Preis

...) bestehen, sollten diese bereits bei der Grundausslegung der Optik protokolliert und ggf. berücksichtigt werden.

Erst wenn diese Parameter (zumindest näherungsweise) klar sind, kann eine konkrete Auswahl kommerzieller Komponenten erfolgen.

Oft sind verschiedene Varianten möglich. Z.B. ändern sich für die gleiche Aufgabenstellungen natürlich Abstände und Brennweiten, wenn eine andere Sensorgröße verwendet wird. Unter Umständen sollten Sie also verschiedene Varianten an Grundausslegungen berücksichtigen.

Natürlich kann es bei der Auslegung eines Gesamtsystems gut möglich sein, dass die Grundausslegung der Abbildung iterativ mehrmals an das Gesamtsystem angepasst werden muss. Unter Umständen zeigt sich später, dass mehrere Kameras statt einer eingesetzt werden sollen und dementsprechend ändern sich unter Umständen z.B. die Objektfelder. Dennoch sollte sich insbesondere der Anfänger darin üben, sehr schnell bei der Analyse der Aufgabenstellung bzw. der Planung des BV-Systems in möglichen Abbildungen zu denken und diese schnell auslegen können.

Kapitel 3

Mathematische Beschreibung der Bildentstehung und das Abtasttheorem

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Wie die Antwort linearer, verschiebungsinvarianter Systeme beschrieben wird
- Wie lineare Filter im Ortsraum und im Ortsfrequenzraum beschrieben werden.
- Warum und Wie die Basiszerlegung eines Bilds in harmonische Funktionen (Fourier-Transformation) und in abgetastete Punkte (Pixel) vorgenommen wird.
- Wie zwischen dem Ortsraum und dem Ortsfrequenzraum gewechselt wird.
- Was bei der Abtastung eines Bilds beachtet werden muss.

Dazu werden wir uns mit etwas mathematischer Theorie beschäftigen müssen. Es gibt sehr wenige Stellen in der industriellen Bildverarbeitung wo dies notwendig wird aber *die* zentrale Theorie für uns ist die lineare Systemtheorie. Ohne Kenntnis dieses Bereichs ist es kaum möglich, ein wirkliches Verständnis der Beschreibung von Optik, aber auch der Algorithmik von Bildverarbeitung, zu erlangen denn für die digitale Verarbeitung der Bilder ist die lineare Systemtheorie als Grundlage der (linearen) Filterung von Bildern unerlässlich.

Die lineare Systemtheorie ist also absolut fundamental sowohl für die Optik wie auch die Algorithmik der Bildverarbeitung. Es lohnt sich an dieser Stelle daher, einen gewissen Aufwand zu investieren. Für uns essentiell sind die Fouriertransformation, das Abtasttheorem, die Beschreibung der Bildqualität mittels der Modulationstransferfunktion (MTF).

Weil die lineare Systemtheorie so vielseitig ist und in so vielen verschiedenen Bereichen von Bedeutung ist, werden Studenten der Ingenieurs- oder Naturwissenschaften mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die eine oder andere Weise bereits mit dem Gebiet vertraut sein. Meist im Sinne einer Beschreibung von Zeitsignalen. In der Optik begegnet uns die Fouriertransformation ebenfalls bei Zeitsignalen (z.B. Spektralzerlegung durch Prisma oder Gitter). Für die Theorie der Abbildung und die Algorithmik der Bildverarbeitung sind aber zweidimensionale räumliche Fouriertransformation von Belang und hierauf wollen wir uns im folgenden vor allem konzentrieren.

3.1 Lineare, invariante Systeme

Wir starten mit einer kleinen systemtheoretischen Betrachtung, um näher zu verstehen, warum Fouriertransformationen so wichtig für die Beschreibung von Systemen sind bevor wir dann sehen wie immens wichtig sie vor allem in der Optik und in der Bildverarbeitung sind.

In Abb. 3.1.1 ist ein technisches System im Zeitbereich visualisiert. Das System liefert hier ein Ausgangssignal $o(t)$ wenn es mit einem Eingangssignal $i(t)$ beaufschlagt wird.

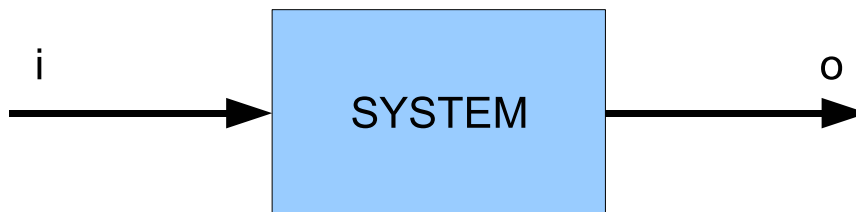


Abbildung 3.1.1: Black-Box Modell

Eine besondere Bedeutung haben lineare Systeme. Ein **lineares System** liefert einfach die Summe einzelner Ausgangssignale, wenn es mit der Summe von Ein-

gangssignalen beaufschlagt wird:

$$i_1 \rightarrow o_1 \quad (3.1)$$

$$i_2 \rightarrow o_2 \quad (3.2)$$

$\Rightarrow$

$$i_1 + i_2 \rightarrow o_1 + o_2 \quad (3.3)$$

D.h. die Signal i_j werden unabhängig voneinander durch das System geleitet.

Daraus ergibt sich (noch etwas allgemeiner ausgedrückt)

$$a_1 i_1 + a_2 i_2 \rightarrow a_1 o_1 + a_2 o_2 \quad (3.4)$$

mit den Konstanten a_1 und a_2 . Wir haben bei dieser Beschreibung im übrigen wieder nicht angegeben, ob wir im Zeit- oder Frequenzbereich oder einer gänzlich anderen Darstellung arbeiten.

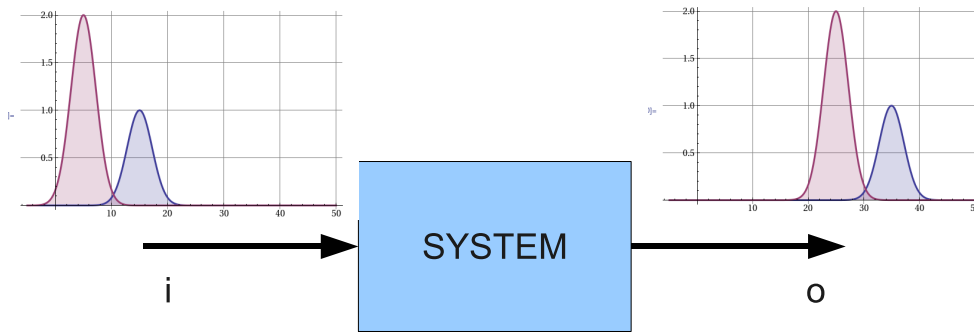
Sehr viele praktische Systeme sind linear oder werden in erster Näherung durch ihr linearisiertes System ausreichend gut beschrieben. Nehmen Sie als Beispiel ein Telefon: Wenn Sie gleichzeitig sprechen und Klavier spielen, dann wird am anderen Ende der Leitung die Summe beider Signale “Klavier + Sprache” den Lautsprecher verlassen. Erst wenn das Gesamtsignal zu groß wird, ist die Linearität nicht mehr gegeben (“Übersteuerung”).

In der Optik tritt die Linearität in vielfältiger Weise auf. Z.B. werden bei einer Abbildung die einzelnen Objektpunkte unabhängig voneinander durch das Abbildungssystem abgebildet. Man präsentiert also quasi am Eingang eine Summe elementarer Signale (z.B. einzelne Objektpunkte) und erhält am Ausgang die Summe aller entsprechender Bildpunkte. Grundsätzlich ergibt sich die Linearität der Optik aus den elementaren Grundgleichungen der Elektrodynamik¹, den Maxwell-Gleichungen. Da diese linear sind, sind auch die aus ihnen abgeleiteten Gleichungen der Optik linear.²

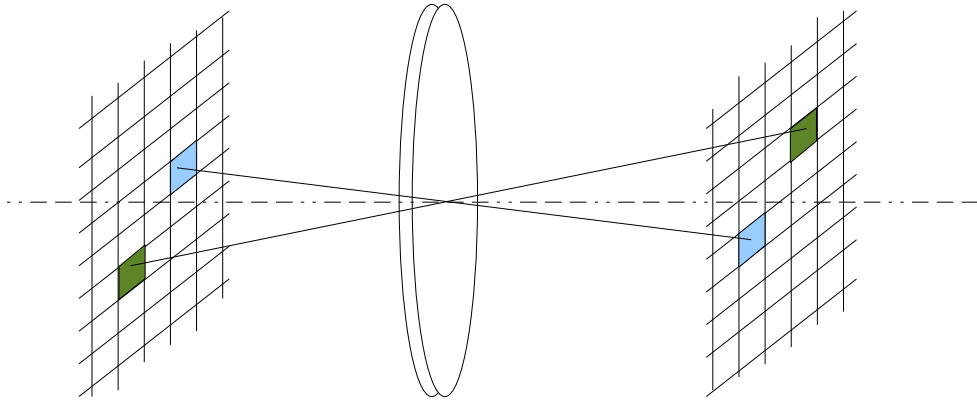
In vielen Fällen hat man es darüber hinaus mit sogenannten *invarianten Systemen* zu tun. Das Telefon kann wieder gut als anschauliches Beispiel für ein zeit-

¹Die Optik ist klassisch eine Untermenge der Elektrodynamik.

²Natürlich bedeutet das nicht, dass keine nichtlinearen Ausdrücke in Gleichungen auftreten. Linearität meint hier die Linearität in der oben dargestellten Art für Systeme.



(a) Pulsübertragung durch elektrisches System



(b) optische Abbildung

Abbildung 3.1.2: Lineare, verschiebungsinvariante Systeme

invariantes System dienen: Zwei exakt gleich klingende Worte, im Abstand einer Sekunde gesprochen, werden am Ausgang ebenfalls den Abstand 1 Sekunde aufweisen und sich hinsichtlich des Klangs (bzw. der Signalform) nicht unterscheiden. Allgemeiner ausgedrückt: Das System liefert ein Ergebnis, das invariant hinsichtlich einer (zeitlichen) Verschiebung ist. Beachten Sie: Die Invarianz bezieht sich **NICHT** darauf, dass eine Sekunde Unterschied am Eingang auch eine Sekunde am Ausgang bewirkt. Vielmehr ist entscheidend, dass das Signal zu den beiden unterschiedlichen Zeiten gleich bleibt.

Bei der bereits angesprochenen optischen Abbildung haben wir entsprechend eine (näherungsweise) Invarianz gegenüber *räumlichen* Verschiebungen.³ Der Abstand zwischen den Bildpunkten kann durchaus vom Abstand zwischen den Objektpunkten differieren⁴. Die Form der Bildpunkte (ausgedrückt z.B. durch die Punktbildverwaschungsfunktion, vgl. Kapitel 4) ist aber näherungsweise konstant und gleiche Abstände im Objektraum werden in gleiche Abstände im Bildraum transformiert.

³Das Gebiet in dem diese näherungsweise Konstanz gilt wird üblicherweise "isoplanatische Region" genannt.

⁴Nur bei einer 1:1 Abbildung sind die Abstände im Bildraum exakt gleich den Abständen im Objektraum.

Wir wollen zunächst etwas näher auf die Folgen eingehen, die sich *ganz allgemein* für die Beschreibung eines linearen-invarianten Systems ergeben.

Hierzu zerlegen wir eine beliebige Eingangsfunktion, die auf unser System trifft in unendlich viele unendlich kurze Peaks, d.h. sogenannte δ -Funktionen⁵. Die δ -Funktion ist dabei einerseits unendlich kurz ausgedehnt, andererseits aber auch unendlich hoch so dass die Fläche unter der δ -Funktion letztlich 1 ergibt, also $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$. Wie dem auch sei: Anschaulich zerlegen wir unser Objekt in unendlich viele Einzelpunkte, die wir getrennt abbilden. Weil wir ein lineares System annehmen können wir dann am Systemausgang die Summe der Systemantworten auf die einzelnen Punkte bilden.

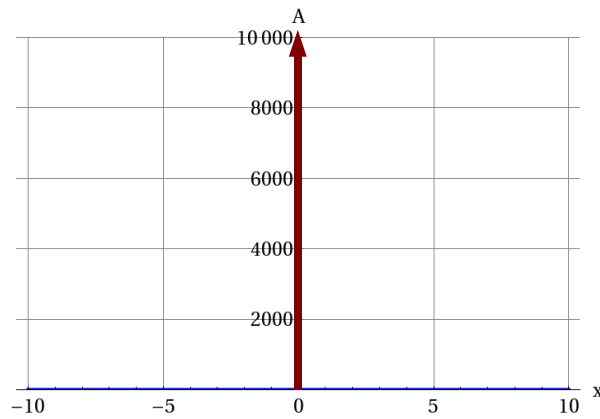


Abbildung 3.1.3: Veranschaulichung der Delta-Funktion: Der Wert der Deltafunktion ist an der Stelle $x=0$ unendlich und an allen Stellen $x \neq 0$ Null.

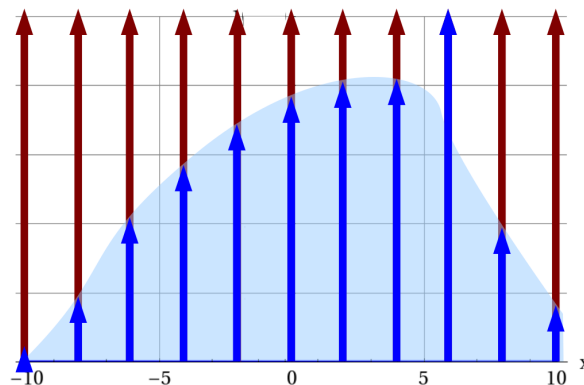


Abbildung 3.1.4: Zerlegung mit Deltas. Die Multiplikation einer kontinuierlichen Funktion (hellblau) mit einem Deltakamm (rot) führt zu einer Diskretisierung nach Gleichung 3.5

⁵Mathematisch ist diese Sprechweise extrem lax. Es müsste eigentlich von δ -Distributionen gesprochen werden. Wir werden hier aber — unserer allgemeinen Fahrlässigkeit folgend — auf eine genauere (mathematisch korrekte) Beschreibung mit Grenzwerten zu Gunsten der Anschaulichkeit verzichten.

Natürlich sind die δ -Funktionen bei unserer Basiszerlegung gegeneinander verschoben. Für Objekte (bzw. Bilder) ist dies besonders anschaulich. In diesem Fall kann man sich die einzelnen δ -Funktionen ja einfach als ideale Punkte in der Objektebene bzw. (unendlich feine) Pixel vorstellen⁶. Wir zerlegen also gemäß Gl. 3.15

$$i(x) = \sum_i a_i \delta(x - \delta x_s). \quad (3.5)$$

Die a_i sind bei einem solchen Objekt einfach die Helligkeiten der entsprechenden Objektpunkte s .

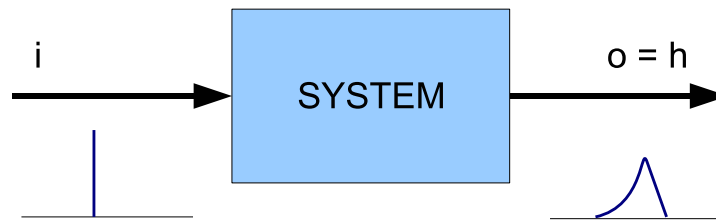


Abbildung 3.1.5: Black-Box Modell

Gemäß Gleichung 3.4 ergibt sich am Ausgang des Systems (also z.B. im Bild) wegen

$$\delta(x) \rightarrow h(x) \quad (3.6)$$

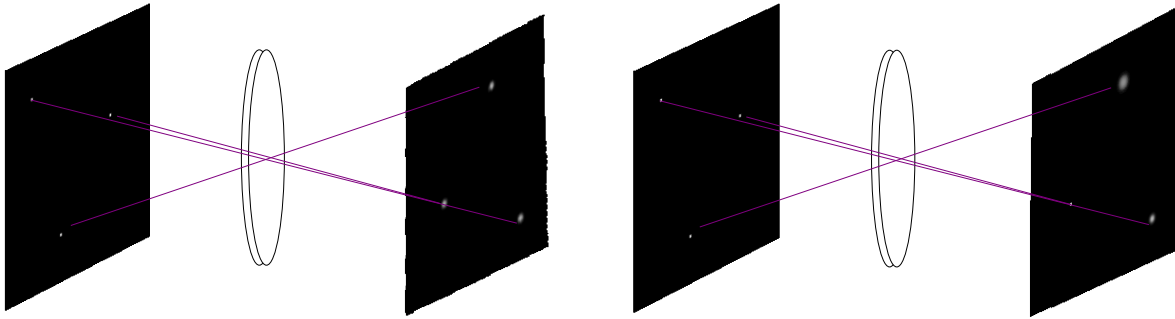
$$(3.7)$$

$$o(x) = \sum_i a_i h(x - \delta x_i) \quad (3.8)$$

wenn wir die *Antwort* auf einen elementaren δ -Impuls mit $h(x)$ bezeichnen.

Für den kontinuierlichen Fall mit unendlich vielen Objekt- und Bildpunkten wird die Summe natürlich durch ein Integral ersetzt und die Gleichungen 3.4 und 3.8 werden zu

⁶Für Zeitsignale ist $\delta(t)$ entsprechend ein Zeitpunkt.



(a) Invarianz gegenüber räumlicher Verschiebung, Isoplanasie, (b) Varianz gegenüber räumlicher Verschiebung

Abbildung 3.1.6: Invarianz der Antwort bei räumlicher Verschiebung (Verschiebungsinvarianz)

$$i(x) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x') \delta(x - x') dx' \quad (3.9)$$

$$o(x) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x') h(x - x') dx' \quad (3.10)$$

Beide Gleichungen sind sogenannte Faltungsintegrale. Sie sind so gebräuchlich, dass es sich lohnt, eine eigene Schreibweise für die Faltung einzuführen:

$$f(x) * g(x) := \int_{-\infty}^{\infty} f(x') g(x - x') dx'. \quad (3.11)$$

Gleichung 3.10 wird damit zu dem wichtigen Ergebnis

$$o(x) = i(x) * h(x) \quad (3.12)$$

d.h. das Ausgangssignal eines invarianten linearen Systems ergibt sich durch Faltung des Eingangssignals mit der Systemantwort $h(x)$ auf einen δ -Impuls. Als Merkregel: **„Jedes (lineare, zeitinvariante) Filter ist ein Falter.“**

Wenn wir also das Verhalten $h(x)$ am Ausgang des Systems für einen unendlich kurzen Eingangsimpuls kennen, sind wir in der Lage die Antwort des Systems auf ein beliebiges Eingangssignal i zu berechnen. Wir wissen also alles über das System, wenn wir seine Antwort auf einen δ -Impuls kennen.

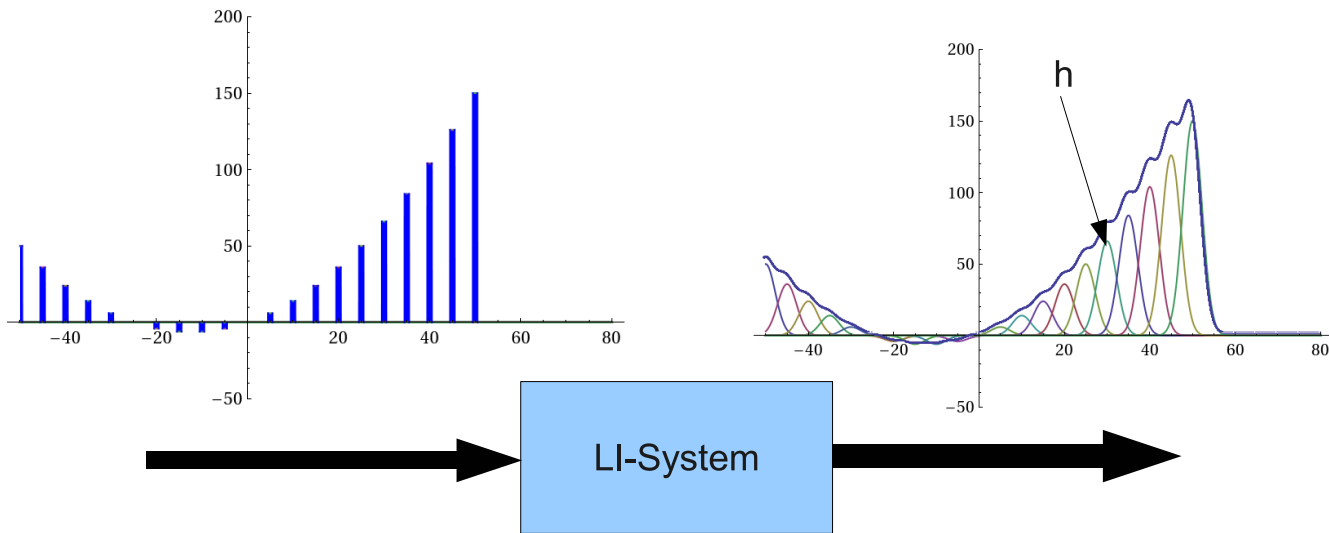


Abbildung 3.1.7: Das Verhalten des LIS auf einen unendlich kurzen Eingangspuls ist ausreichend zur vollständigen Beschreibung der Systemantwort auf ein beliebiges Eingangssignal. Man denkt sich das Eingangssignal als aus einer Summe gewichteter Delta-Funktionen bestehend. Am Ausgang bekommt man dann entsprechend eine Summe (Linearität !) von gewichteten Punktbildfunktionen. Beachten Sie: Zur Visualisierung wurde hier als Eingangssignal ein diskretes Signal gewählt. Im Normalfall sind Ein- und Ausgangssignal aber kontinuierlich.

3.2 Eigenfunktionen und die Fouriertransformation

Betrachten Sie die eindimensionale Funktion $f(x) = \sin(x^2)$. Es mag Ihnen ganz natürlich erscheinen, dass dieses $f(x)$ die Funktion selbst ist. Um die Funktion beispielsweise an der Stelle $x = 2,5$ zu berechnen setzen wir einfach den Wert $x = 2,5$ in die Funktion ein und erhalten sofort $f(x = 2,5) = \sin(2,5^2) \approx -0,03318$. Soweit so gut.

Sie können zu demselben Ergebnis aber auch auf wesentlich kompliziertere Weise gelangen. Zum Beispiel könnten Sie $f(x)$ mittels

$$\sin(x^2) \approx x^2 - \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{120}x^{10} - \dots \quad (3.13)$$

bestimmen.

Warum sollten wir diesen Umweg gehen? Eine mögliche Antwort ist sicher, dass wir damit eine Berechnung komplizierter Funktionen (hier: Sinus) vermeiden. Das ist aber bei weitem noch nicht alles.

Mathematisch betrachtet haben wir die zu berechnende Funktion mit Gl. 3.13

durch eine Summe aus gewichteten Elementarfunktionen (bzw. Basisfunktionen) $g_i(x)$ beschrieben, d.h.

$$f(x) = \sum_{i=0}^{i=N} a_i g_i(x) \quad (3.14)$$

$$= \sum_{i=0}^{i=N} a_i x^i \quad (3.15)$$

N muss dabei theoretisch Unendlich sein, um eine exakte Lösung zu erzielen. In der Praxis gibt man sich natürlich mit Näherungen zufrieden und bricht die Summation an geeigneter Stelle ab. Die Basisfunktionen $g_i(x) = x^i$ haben den Vorteil, dass eine einfache Berechnung (Arithmetik durch Addition und Multiplikation) möglich wird.

Wir können aber auch ganz andere Basisfunktionen verwenden. So haben wir im letzten Abschnitt z.B. verschobene Delta-Funktionen gewählt. Auch dort ist das Originalsignal *die gewichtete Summe* vieler Delta-Impulse

Grundsätzlich sind viele solcher Systeme von Basisfunktionen möglich. Nur wenige sind allerdings wirklich praxisrelevant und ergeben einen direkten Nutzen. Das System mit der größten Bedeutung ist das System ebener Wellen (bzw. harmonischer Schwingungen) das uns zur Fouriertransformation führt⁷

$$g_i(x) = e^{2\pi i u x} = \cos(2\pi u x) + i \sin(2\pi u x) \quad (3.16)$$

Eine Funktion wird in diesem System eben durch die Summe

$$f(x) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} a_u e^{2\pi i u x} \quad (3.17)$$

dargestellt.

Ein Beispiel zeigt Abb. 3.2.8 bei der die Zerlegung einer periodischen Rechteckschwingung in Sinusschwingungen (der Imaginärteil von Gleichung 3.17) dargestellt ist. Bereits die Überlagerung (blaue Kurve) von 3 Sinusschwingungen (orangene Kurven) nähert das Signal einigermaßen brauchbar an.⁸

⁷Die verwendeten Konstanten in Gl. 3.16 wurden hier mehr oder weniger willkürlich gewählt.

⁸Es zeigt sich, dass eine reine Überlagerung von reellen Sinusschwingungen nur einen Teil aller in der Praxis auftretenden Funktionen beschreiben kann. Um wirklich alle (mathematisch gutartigen) Funktionen darstellen zu können benötigt man zusätzlich phasengeschobene Sinusfunktionen (bzw. den Kosinus) und eine imaginäre Gewichtung von einigen Funktionen. Oder aber man geht direkt zu der Zerlegung mit komplexen Exponentialfunktionen (Gl.3.17).

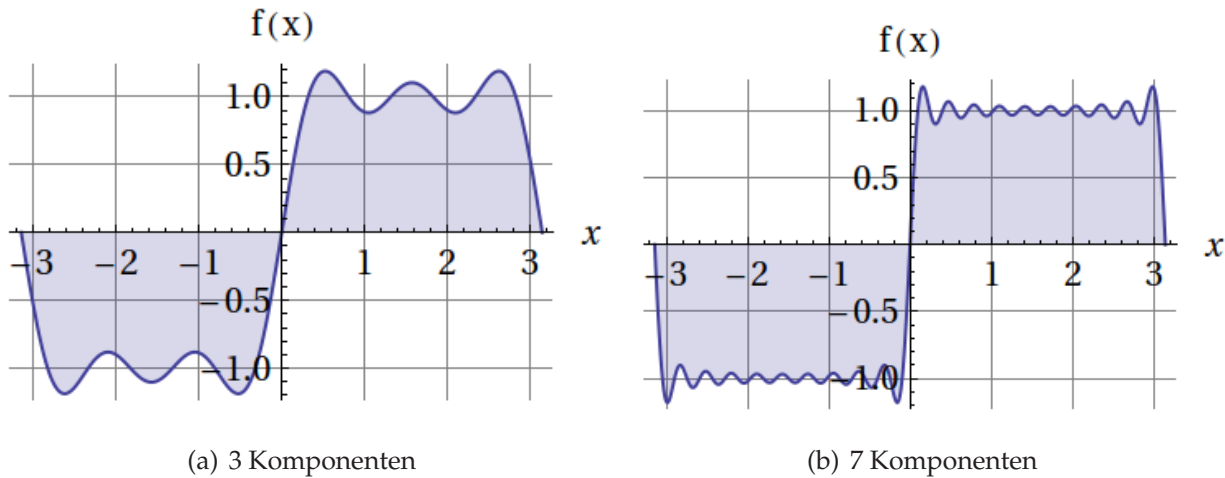


Abbildung 3.2.8: Durch Addition von vielen Sinusschwingungen passender Amplitude und Phase kann man nahezu jede Funktion nähern.

Die besondere Bedeutung der harmonischen Basisfunktionen liegt in ihrer Eigenschaft, *Eigenfunktionen* von linearen Systemen zu sein. D.h. beim Durchgang durch das lineare System behält das Sinussignal seine Form. Es kann zwar phasenverschoben werden und die Amplitude des Sinus darf sich ändern, aber es bleibt ein Sinus und auch die Frequenz des Sinus ändert sich nicht (siehe Abb. 3.2.9).

Das ist mit Sicherheit eine sehr außergewöhnliche Eigenschaft denn im allgemeinen ändert sich eine Signalform beim Durchgang durch ein lineares System ganz erheblich. Z.B. wird ja aus einem ideal abgebildeten Punkt bei der optischen Abbildung nicht wieder ein idealer Punkt. Und weil die Antwort des Systems auf diese speziellen harmonischen Basisfunktionen so einfach ist, macht es Sinn, genau diese Basisfunktionen als Grundkomponenten zu verwenden, in die wir unsere Eingangssignale zerlegen.

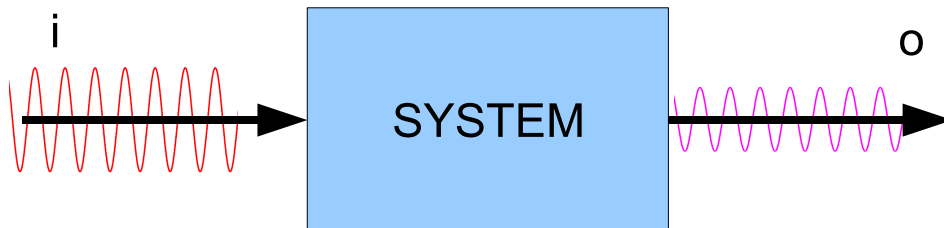


Abbildung 3.2.9: Sinus- und Kosinusschwingungen sind Eigenfunktionen von linear invarianten Systemen und werden daher beim Durchgang durch das System nicht verzerrt sondern lediglich abgeschwächt/verstärkt und eventuell phasengeschoben.

Mathematisch gilt also für die Eigenfunktion $i(x)$:

$$o(x) = h(x) * i(x) \stackrel{!}{=} k \cdot i(x) \quad (3.18)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} i(x') h(x - x') dx' \quad (3.19)$$

Die Grundidee zur Berechnung der Antwort des Systems auf ein beliebiges Eingangssignal ist also folgende: Wir zerlegen das Eingangssignal in die Basisfunktionen $g_u = \exp(2\pi i u x)$, berechnen dann die Antwort des linearen Systems auf die einzelnen Basisfunktionen (lediglich Multiplikationen mit einem konstanten Faktor $a(u) = A_u \cdot \exp(i\phi_u)$ und summieren schließlich diese Antworten.

Dadurch sparen wir uns die oft mühsame Berechnung der Faltung des Eingangssignals mit der Punktantwort.

Diese Vorgehensweise kann zum einen rein mathematisch vorteilhaft sein, aber teilweise können auch direkt die Systemantworten auf die verschiedenen Basisfunktionen direkt oder einfach erfasst werden. Insbesondere zeigt sich, dass im Fokus eines optischen Systems gerade die Koeffizienten dieser Zerlegung auftreten, wenn wir als Eingangssignal das Feld in der Pupillenebene betrachten (s.u.).

Wir können nun Gl. 3.17 für ein kontinuierliches Signal $f(x)$ verallgemeinern. Die Summe wird dabei zu einem Integral:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} a(u) e^{2\pi i u x} du \quad (3.20)$$

Mathematisch betrachtet haben die verwendeten Variablen u und x noch überhaupt keine Bedeutung. x steht zwar normalerweise für den Ort, aber letztlich können wir hier beliebige physikalische Größen verwenden, z.B. die Zeit wie es beispielsweise bei der zeitlichen Veränderung einer elektrischen Spannung notwendig wäre.

In Gl. 3.20 haben wir zunächst ein uns unbekanntes $a(u)$ angesetzt. Die Frage ist natürlich, wie wir dieses $a(u)$ konkret wählen müssen, um ein ganz spezielles $f(x)$ nach Gl. 3.20 zu erzielen. Das geschieht eben durch die *Fouriertransformation*

$$a(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i u x} dx \quad (3.21)$$

Gleichung 3.21 ist die Fouriertransformation für räumliche Signale⁹. Gleichung 3.20 ist entsprechend die *inverse Fouriertransformation*. Wie man leicht durch Einsetzen verifiziert gilt $FT^{-1}[FT[f(x)]] = f(x)$.

Teilweise werden unterschiedliche Normierungskonstanten bei der (inversen) Fouriertransformation verwendet. Wir verwenden hier die in der Optik übliche Nomenklatur nach Goodman[10]. Letztlich ergeben sich bei anderer Wahl der Normierung aber keine relevanten Änderungen der Mathematik.

Wir haben damit formal die Fouriertransformation und ihre Umkehrung im Sinne einer (motivierten) Definition eingeführt. Die Basiszerlegung unseres Signals ist also eine inverse Fouriertransformation und die Koeffizienten unserer Zerlegung ergeben sich gerade durch die Fouriertransformation.

3.3 Die Fouriertransformation von Bildern

In der Bildverarbeitung interessieren wir uns meist für zweidimensionale räumliche Fourierzerlegungen. Das Fourierpaar der Zerlegung in Basisfunktionen (inverse Fouriertransformation) und Bestimmung der Zerlegungskoeffizienten F (Fouriertransformation) wird also geschrieben als

$$IFT : f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{2\pi i (ux+vy)} du dv \quad (3.22)$$

$$FT : F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i (ux+vy)} dx dy \quad (3.23)$$

$$(3.24)$$

offensichtlich sind beide Formeln nahezu symmetrisch zueinander (Vorzeichenwechsel des Exponenten) und man kann in der Tat leicht beweisen, dass $IFT(FT(f(x, y))) = f(x, y)$.

Die Basisfunktion der “Schwingung” ist hier keine zeitliche Schwingung sondern vielmehr eine periodische Variation der Lichtamplitude in der Raumkoordinate.

⁹Ganz entsprechend kommt man zu zeitlichen Signalen, indem man das x durch t sowie das u durch f ersetzt.

Das klingt recht abstrakt, ist aber eigentlich sehr simpel: Wir sprechen von einem periodischen Gitter, im einfachsten Idealfall von einem Sinusgitter.

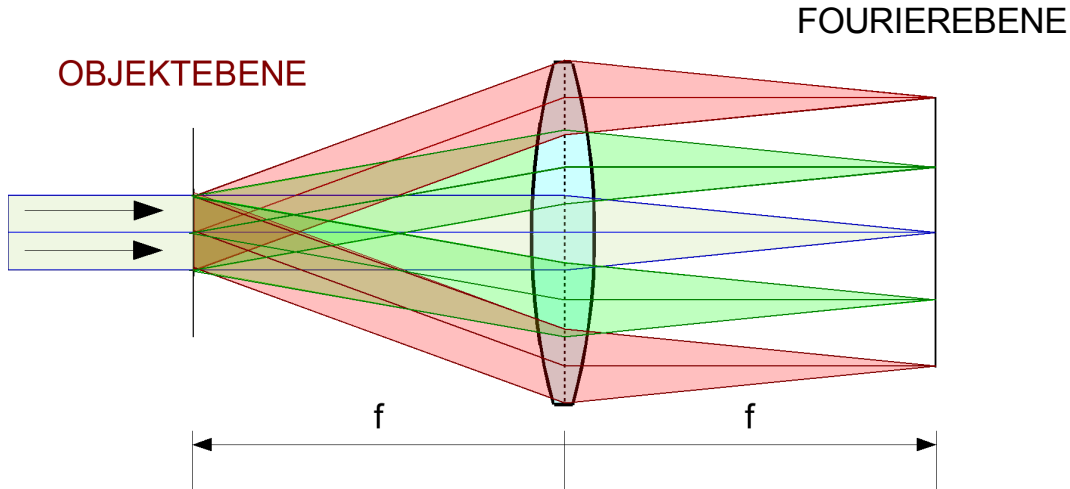


Abbildung 3.3.10: Die Linse als einfaches System zur räumlichen Fouriertransformation. Dargestellt ist die Beugung an fünf Sinusgittern mit unterschiedlicher Frequenz.

In Analogie zur gewöhnlichen (Zeit-)Frequenz nennt man u und v die Raumfrequenzen (in x - und in y -Richtung). Oft verwendet man auch den Wellenzahlvektor $\vec{k}$, der einfach das 2π -fache des Raumfrequenzvektors ist:

$$\vec{k} = 2\pi(u, v, w) \quad (3.25)$$

3.4 Berechnung

Nun kommen wir zurück zu unserer ursprünglichen Aufgabe, den Ausgang des LIS zu berechnen. Wir denken uns also das Eingangssignal $i(x)$ dargestellt durch seine Fouriertransformierte $I(u)$.

$$i(x) := \int_{-\infty}^{\infty} I(u) e^{2\pi i u x} du \quad (3.26)$$

Jede Komponente $e^{2\pi i u x}$ wird um einen komplexen Faktor $H(u)$ durch das System modifiziert und daher können wir schreiben (Linearität):

$$o(x) = \int_{-\infty}^{\infty} H(u) I(u) e^{2\pi i u x} du \quad (3.27)$$

$o(x)$ kann aber natürlich genauso wie $i(x)$ zerlegt werden:

$$o(x) := \int_{-\infty}^{\infty} O(u) e^{2\pi i u x} du \quad (3.28)$$

Durch Gleichsetzen von Gl. 3.27 und 3.28 ergibt sich dann direkt

$$O(u) = H(u)I(u) \quad (3.29)$$

Dies ist ein bedeutsames Resultat, der sogenannte *Faltungssatz*. Es sagt uns, dass wir den Ausgang des LIS nicht nur durch die recht komplizierte Faltung (immerhin eine Integration) sondern auch durch eine einfache Multiplikation beschreiben können. Dies ist aber eben nur dann möglich, wenn wir uns im (Orts-)Frequenzraum befinden.

Abb. 3.4.11 zeigt nochmals zusammengefasst die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten zur Berechnung der Antwort eines LIS. Abgesehen von der reinen Möglichkeit der Berechnung der Faltung ist dieses Ergebnis der zentrale Ausgangspunkt für die zur Beschreibung der Qualität von Optiken üblicherweise verwendeten Modulationstransferfunktion (Kapitel 4).

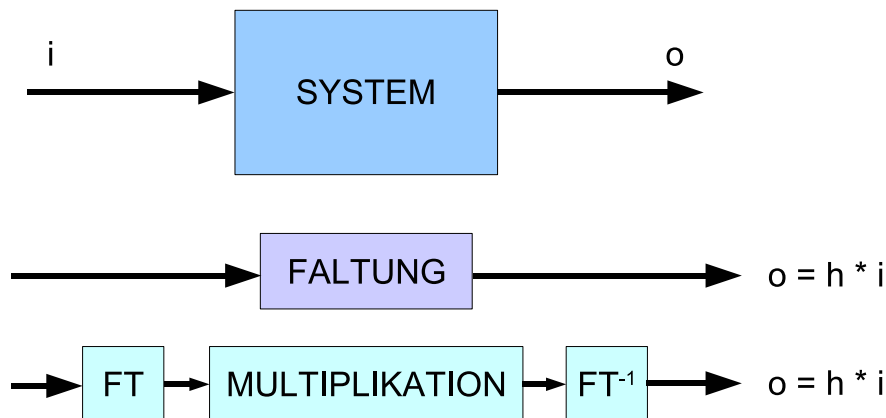


Abbildung 3.4.11: Im wesentlichen haben wir zwei Möglichkeiten, das Ausgangssignal eines linearen invarianten Systems zu berechnen. Der direkte Weg bleibt im Orts- bzw. Zeitraum und berechnet die Faltung mit der Punktbildfunktion. Der indirekte (aber teilweise wesentlich einfachere und anschaulichere) Weg berechnet die Faltung durch eine Multiplikation im Orts- bzw. Zeitfrequenzraum (Faltungssatz).

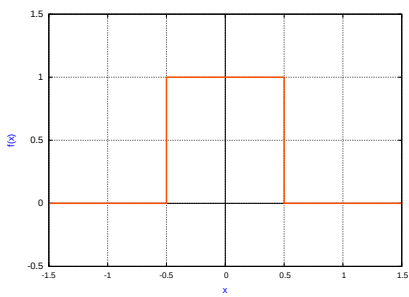
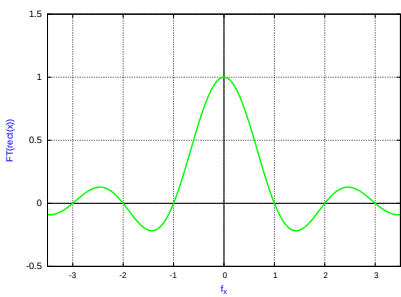
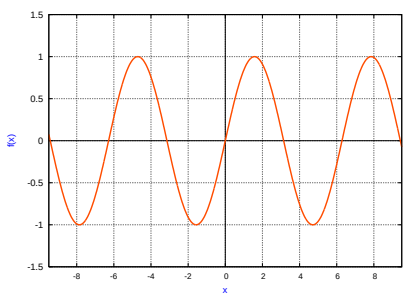
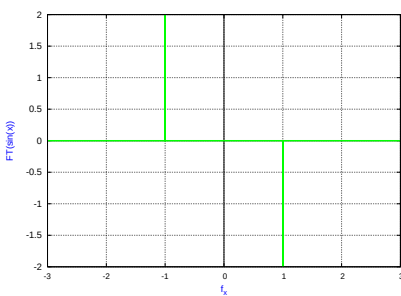
3.5 Einige Fourierpaare

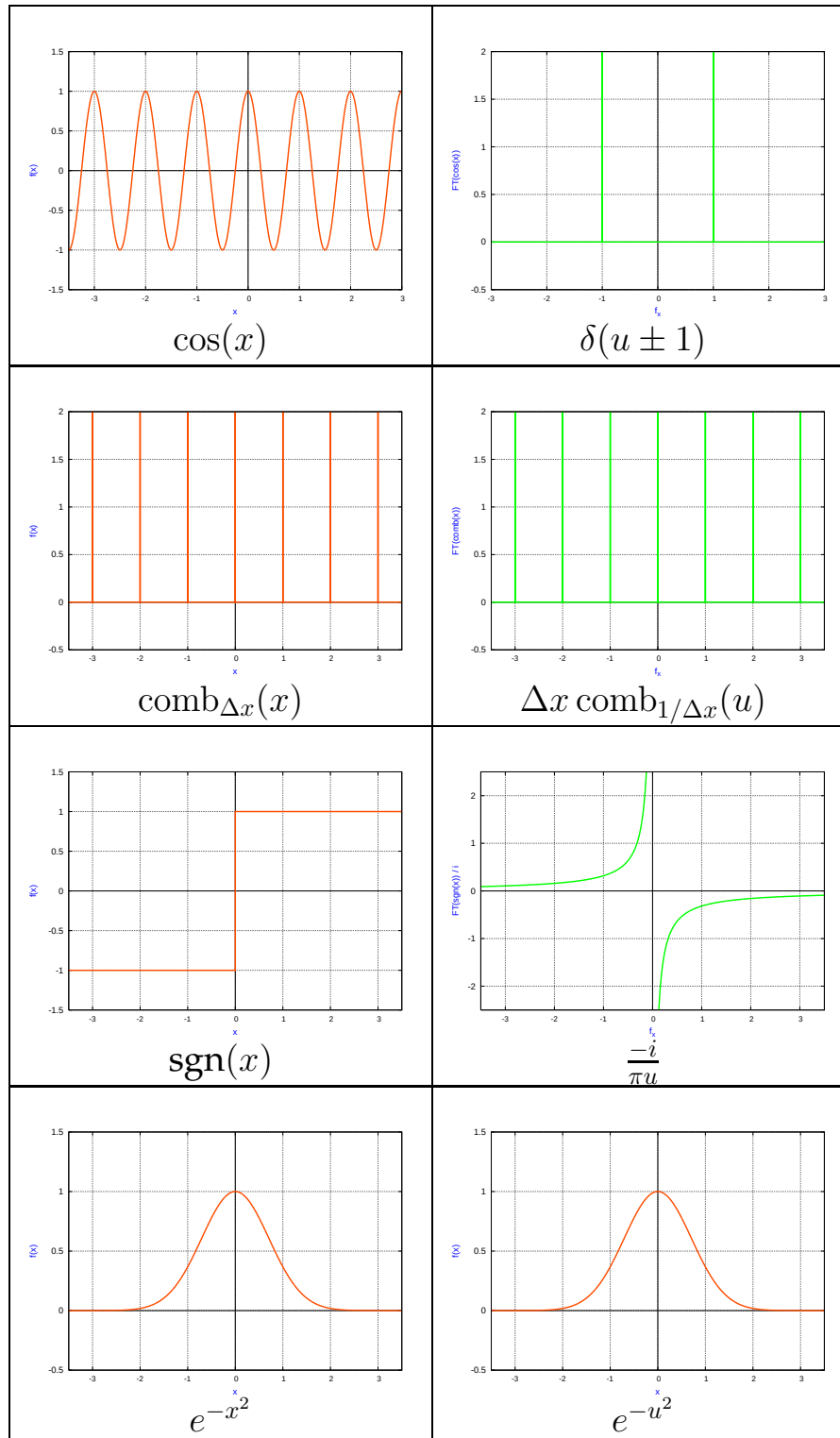
Die Beschreibung optischer Systeme mittels der Fouriertheorie wird insbesondere dadurch mathematisch praktikabel, dass vergleichsweise leistungsfähige Theoreme die Berechnung von Fouriertransformationen erheblich vereinfachen.

In der Praxis ist eine symbolische Integration der Fouriertransformation ist selten notwendig. Für numerische Probleme stehen leistungsfähige Algorithmen (vor allem die Fast Fourier Transform, FFT) zur Verfügung und einfache Funktionen lassen sich meist mittels der elementaren Fourier Theoreme berechnen. Wir wollen hierauf an dieser Stelle nicht näher eingehen sondern verweisen den geneigten Leser auf [10] oder [11].

Allerdings wollen wir zumindest die Fouriertransformation für einige wichtige Grundsignale angeben. Aufgrund der Symmetrie zwischen Fouriertransformation und inverser Fouriertransformation sind die Fourierpaare jeweils in beide Richtungen lesbar. Das bedeutet, dass z.B. eine Rechteckfunktion im Ortsbereich, die zu einer sinc-Funktion im Ortsfrequenzbereich führt genauso im Frequenzbereich betrachtet werden kann. Dies bedeutet in diesem Fall, wird also auch eine Rechteckfunktion im Ortsfrequenzbereich zu einer sinc-Funktion im Ortsbereich.

Wir listen die Fourierpaare für die eindimensionale räumliche Fouriertransformation.

Funktion im Ortsraum	Fouriertransformation
 $\text{rect}(x)$	 $\text{sinc}(u)$
 $\sin(x)$	 $i(\delta(u+1) - \delta(u-1))$



3.6 Das Abtasttheorem

Bisher haben wir kontinuierliche Funktionen betrachtet. Das ist — zumindest auf den ersten Blick — auch sinnvoll, denn bei einer Abbildung bilden wir ein kontinuierliches Objekt ab. Eine diskrete Beschreibung ist dennoch von Bedeutung. Zum einen sind wir bei einer Bearbeitung im Computer meist auf eine numerische Behandlung angewiesen und müssen daher eine Diskretisierung durchführen, zum anderen ist die eigentliche Messung eine Diskretisierung. Bei der Abbildung tastet beispielsweise der Bildaufnehmer das abgebildete Objekt an N Stützstellen (entsprechend den Pixeln des Bildes) ab.¹⁰

Wir müssen also von der kontinuierlichen Beschreibung zu einer diskreten Beschreibung übergehen. Wir gehen im folgenden davon aus, dass die Stützstellen, auf denen die Messpunkte liegen, in äquidistantem Abstand Δx zueinander liegen. Das muss nicht immer der Fall sein. Manchmal wäre sogar eine andere Wahl der Stützstellen, z.B. in bestimmten Regionen eine erhöhte Anzahl, sinnvoller. In der Regel weisen aber die in der Optik verfügbaren Aus- und Eingabemedien, z.B. LCDs und CCDs, ein gleichmäßiges Raster von Stützstellen auf.

Die einfachste und sinnvollste Möglichkeit, die Integration der Fouriertransformation über die äquidistanten Messpunkte durchzuführen, ist, sie einfach zu summieren. Wir wissen zunächst nicht, was sich zwischen den Messpunkten abspielt und nehmen durch diese Summation einfach an, dass sich der Signalverlauf zwischen zwei Messstellen nur wenig ändert.

Wir setzen also

$$a(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) e^{-2\pi i \mu x} dx \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} A(n\Delta x) e^{-2\pi i \mu n \Delta x} \quad (3.30)$$

Dies ist die diskrete Fouriertransformation (DFT). Die schnelle Fouriertransformation (engl. Fast Fourier Transform, FFT) ist einfach ein Algorithmus, der es erlaubt, die DFT sehr effizient zu berechnen. Alle Ergebnisse, die für die DFT gewonnen werden sind dementsprechend genauso für die FFT gültig.

¹⁰Dasselbe Problem haben wir bei elektrischen Signalen: Wir können (und wollen es im übrigen auch nicht) einen Spannungsverlauf nicht unendlich genau vermessen. Wir haben uns auf eine begrenzte, ausreichende Anzahl von Messpunkten zu beschränken

Es stellt sich sofort die Frage, wieviele Stützstellen benötigt werden, um den durch die Approximation gegebenen Fehler nicht zu groß werden zu lassen.

Mathematisch können wir die ideale, punktförmige Abtastung einer Funktion $f(x)$ durch

$$g(x) = \text{comb}_{\Delta x}(x) \cdot f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - k\Delta x) f(x) \quad (3.31)$$

beschrieben¹¹.

Die Kammfunktion $\text{comb}_{\Delta x}(x)$ ist dabei eine Folge von äquidistanten Delta-Peaks mit dem Abstand Δx .

Im Frequenzraum erhalten wir damit mit dem Faltungssatz (Gl. 3.29).

$$G(u) = F(u) * \text{comb}_{1/\Delta x}(u), \quad (3.32)$$

denn die Fouriertransformation der Kammfunktion ist wieder eine Kammfunktion.

Die Faltung einer Funktion mit einem einzelnen, verschobenen Delta-Peak führt zu einer Verschiebung der Funktion:

$$F(u) * \delta(u - \Delta u) = F(u - \Delta u), \quad (3.33)$$

so dass wir letztlich in Gleichung 3.32 eine Überlagerung vieler gegeneinander verschobener Kopien von $F(u)$ erhalten. Oder in anderen Worten: Es ergibt sich eine periodische Wiederholung des Spektrums der kontinuierlichen Funktion (vgl. Abb. 3.6.12). Die Wiederholungsperiode ist direkt durch $1/\Delta x$ gegeben. Es kommt ganz offensichtlich zu Fehlern wenn das Spektrum von f eine größere Ausdehnung als dieses $1/\Delta x$ hat. In diesem Fall überlagern sich dann die einzelnen spektralen Wiederholungen. Dies ist in Abbildung 3.6.12 für zwei verschiedene Signale demonstriert. Der Fehler kann anschaulich (periodische Wiederholung des Spektrums) durch ein "Umklappen" des Spektrums an der sogenannten *Nyquistfrequenz* u_N (s.u.) begriffen werden. Frequenzen mit $u + u_N$ erscheinen bei $u - u_N$. Man spricht von *Aliasing*.

Den wichtigsten Sonderfall haben wir bei einer sogenannten "Tiefpass-Abtastung": Das Signal wird als begrenzt hinsichtlich hoher Frequenzen angenommen (ein Fall, der sich sowohl in der Optik als auch in der Elektronik

¹¹Die Abtastung mit endlich ausgedehnten Pixeln wird durch eine zusätzliche Faltung des Delta-Kammes mit einer der Pixelbreite entsprechenden rect-Funktion beschrieben. Dazu später mehr.

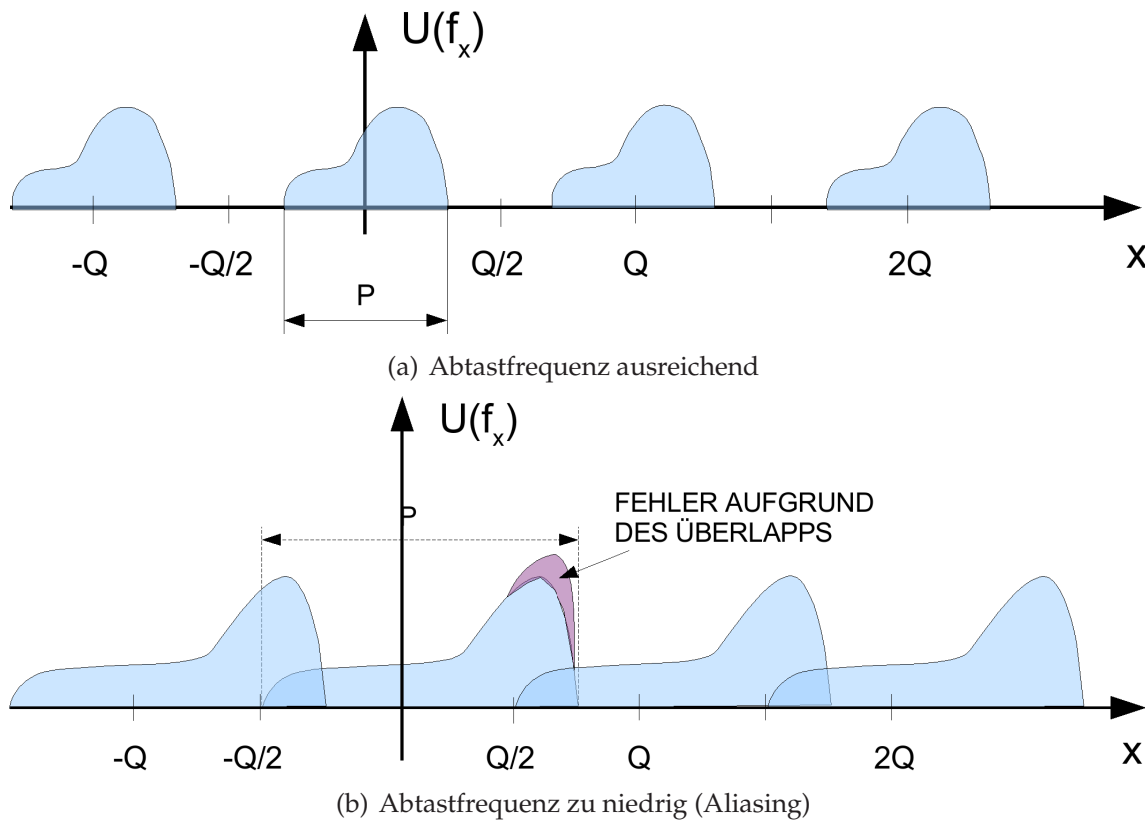


Abbildung 3.6.12: Aliasing durch Nichtbeachtung des Abtasttheorems

bei den meisten Systemen praktisch automatisch ergibt). Eine Begrenzung tiefer Frequenzen findet nicht statt. Wenn ein reelles Signal vorliegt, dann ist weiterhin zu beachten, dass das Spektrum symmetrisch bezüglich $f = 0$ ist. Insgesamt wird die Breite des Spektrums also bei einer maximalen Frequenz von f_g genau $2f_g$ sein.

Damit es zu keinen Überlappungen durch die Abtastung kommt, muss demnach $\frac{1}{\Delta x} \geq 2f_g$ bzw.

$$\Delta x \leq \frac{1}{2f_g} \quad (3.34)$$

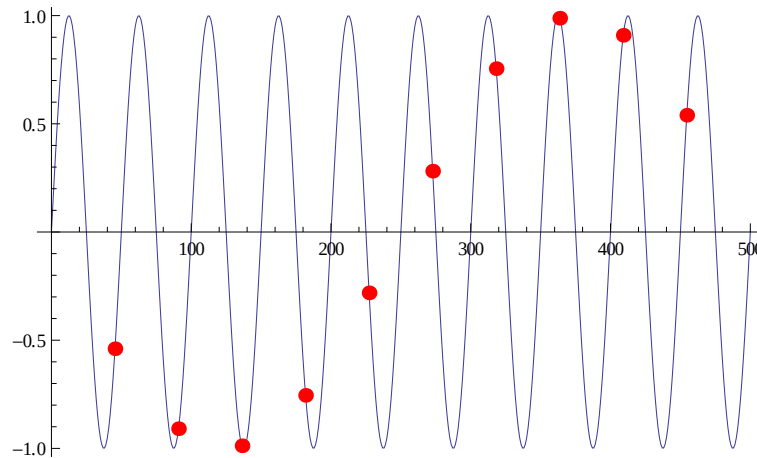
gelten. Mit anderen Worten: Damit es zu keinen Fehlern bei der Abtastung kommt, darf das Signal nur Frequenzen unterhalb der sogenannten *Nyquistfrequenz* $f_N = 1/(2\Delta x)$ enthalten.

Abtasttheorem (engl. Abtasttheorem): Eine korrekte Schätzung der in einem Signal enthaltenen Frequenz ist nur möglich, wenn die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch ist wie die maximale im Signal enthaltene Frequenz. Eine korrekte Schätzung der Amplitude der Schwingung ist damit allerdings zunächst noch

nicht möglich. Hierfür ist eine etwas höhere Abtastfrequenz notwendig. Die maximal im Signal erlaubte Frequenz wird *Nyquist-Frequenz* genannt.

Wir versuchen das Samplingtheorem noch anhand eines einfachen Beispiels anschaulich zu machen. In Abb. 3.6 ist eine Sinusschwingung im Ortsbereich mit der Periode $50 \mu\text{m}$ skizziert. Diese wird mit einer Abtastperiode von $40 \mu\text{m}$ punktwise abgetastet. Offensichtlich ist also das Abtasttheorem verletzt denn dieses würde beinhalten, dass wir mit mindestens $25 \mu\text{m}$ das Signal abtasten.

Bei der Betrachtung des abgetasteten Signals ergibt sich der Eindruck, dass die Signalperiode deutlich größer (ca. $500 \mu\text{m}$) ist. Es ergibt sich also eine drastische Fehleinschätzung hinsichtlich der Signalfrequenz. Es ist also nicht nur so, dass Frequenzen oberhalb der durch das Abtasttheorem gegebenen Grenzfrequenz durch die Abtastung nicht erfasst werden. Vielmehr wird durch das Vorhandensein entsprechender Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz das Ergebnis auch im eigentlichen Messbereich verfälscht. Man spricht von *Aliasing* bzw. Moires.



Bei unterabgetasteten Bildern ergeben sich also vergleichsweise tieffrequente Störungen, die insbesondere dann ins Auge stechen, wenn die Objekte periodische Strukturen aufweisen.

Um entsprechende Fehler zu vermeiden ist es daher unerlässlich, das Eingangssignal hinsichtlich zu hoher Frequenzen zu begrenzen. Aus diesem Grund werden bei akustischen Signalen vor dem Abtasten (Sampeln) entsprechende Tiefpassfilter eingesetzt.

In der Optik muss ebenfalls eine entsprechende Tiefpassfilterung vorgenommen werden. Ein typisches Beispiel ist der Tiefpassfilter bei Farbsensoren (vgl. Abb.

5.10.22). Meist ist bei hohen Abtastfrequenzen, wie sie bei modernen Digitalkameras z.B. üblich sind, die Abtastfrequenz so hoch, dass bereits leichte Unschärfen, wie sie durch Aberrationen, Beugung oder Defokussierung automatisch auftreten, einen ausreichenden Tiefpasseffekt ergeben.

Gehen wir davon aus, dass durch eine entsprechende wie auch immer geartete Tiefpassfilterung im Eingangssignal nur Frequenzen unterhalb von u_g auftreten:

$$G(u) = F(u) \cdot \text{rect}(u/u_g) \quad (3.35)$$

Im Ortsraum erhalten wir dann

$$g(x) = f(x) * \text{sinc}(\cdot) f_g x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[nP] \text{sinc}(x/P - n) \quad (3.36)$$

mit der Abtastperiode P .

Dies ist die Rekonstruktionsformel für abgetastete bandbegrenzte Funktionen. Damit wird es möglich, die Originalfunktion $g(x)$ nicht nur an den eigentlich gemessenen Abtastpunkten zu beschreiben, sondern auch die Zwischenstellen zu berechnen.

In vielen Fällen ist eine entsprechende Rekonstruktion von Zwischenstellen gar nicht nötig oder kann einfach linear zwischen Abtaststellen erfolgen. Man “ahnt” praktisch die Funktion korrekt allein durch Betrachtung der Abtaststellen. Für eine exakte Bestimmung der Zwischenstellen muss Gl. 3.36 allerdings beachtet werden.

3.7 Zusammenhang mit Optik und Bildverarbeitung

Die Fouriertransformation tritt in der Optik in verschiedenen Kontexten auf. Zunächst besteht zwischen dem Zeitverlauf und dem Spektrum des Lichts, also seiner Frequenzzusammenfassung, ein (zeitlicher) Fourierzusammenhang. Verschiedene optische Bauteile (Prismen, Gitter) können durch eine spektrale Aufspaltung diese zeitliche Fouriertransformation sichtbar machen.

In der Bildverarbeitung sind für uns räumliche Fouriertransformationen wesentlicher. Ganz entscheidend sind diese in der Algorithmik, auf die wir aber

hier nicht näher eingehen wollen. Aber auch zur Beschreibung und Optimierung der Bilderfassung sind sie wesentlich und wir werden im nachfolgenden Kapitel ausführlich, auf die zentrale Beschreibung, die Modulationstransferfunktion, eingehen.

Es ist aber instruktiv und vertieft die rein mathematische Einführung, sich klar zu machen, wie sich die Fouriertransformation rein optisch bei der Abbildung ergibt bzw. welche Auswirkungen die Fourierzusammenhänge haben.

Dazu muss man wissen, dass zwischen den Pupillenebenen und der Bildebene ein (Quasi-)Fourierzusammenhang besteht. Abgesehen von einem quadratischen Phasenterm erhält man die Amplitude des Lichtfelds in der Bildebene als die Fouriertransformierte der Amplitude des Lichtfelds in der (Austritts-)Pupillenebene.

Ein Sonderfall ist die Fouriertransformationseigenschaft einer Linse. Die Linse bildet in ihrer hinteren Brennebene die exakte Fouriertransformierte des Lichtfelds der vorderen Ebene. Allerdings bezieht sich der Zusammenhang auf die Amplitude (und nicht die Intensität) des Lichts.

Eine Abbildung kann dann als doppelte Fouriertransformation aufgefasst werden (Abb. 3.7.13). Was passiert, wenn wir als Eingangsverteilung ein sinusförmiges Gitter annehmen? Da die Fouriertransformation eines Sinus zu zwei Delta-Impulsen führt erwarten wir in der Fourierebene (Abb. 3.7.13) also zwei Helligkeitspeaks.

Das macht Sinn denn wir wissen aus der elementaren Beugungstheorie (Beugung am Gitter), dass bei der Beleuchtung eines (Sinus-)gitters mit der Periode p das Licht gemäß $\sin(\phi) = \pm\lambda/p$ abgelenkt wird. Die Linse führt dann dazu, dass dieses abgelenkte aber parallele Licht in der hinteren Brennebene der Linse in zwei getrennte Punkte fokussiert wird (unsere Delta-Peaks). Je feiner das Gitter ist, also je höherfrequent bzw. je geringer die Periode p des Gitters, desto weiter außen liegen die sich ergebenden Peaks.

Stellen wir uns vor, dass in dieser Ebene unsere Blende des optischen Systems liegt. Wir haben dann ein objektseitiges telezentrisches System vor uns. Wenn nun das Gitter hochfrequent genug ist, dann werden die Peaks von der Blende geblockt. Zur Bildebene gelangt also kein Licht und dementsprechend wird das



Abbildung 3.7.13: Ein 4-f System führt nacheinander zwei Fouriertransformation durch und erzielt so letztlich eine (invertierte) Abbildung. Wenn als Objekt ein Sinusgitter verwendet wird, dann ergibt die Fouriertransformation zwei Delta-Peaks, die in der Fourierebene als isolierte Peaks beobachtet werden.

Gitter nicht abgebildet.¹² Hochfrequente Gitter bzw. feine Strukturen führen so zu weit außen (hohe Frequenzen) liegenden Peaks und können so unter Umständen die nachfolgende Optik nicht passieren bzw. werden ausgeblendet.

Die Begrenzung des Lichtdurchgangs durch die “Apertur” des optischen Systems führt so anschaulich zu einer Begrenzung der maximal transmittierten Frequenz und damit zu einer Begrenzung der (lateralen) Auflösung des Systems. Dies ist der wesentliche Inhalt der Beugungsbegrenzung der optischen Abbildung (vgl. Kapitel 5).

Das optische System ist dementsprechend ein *Tiefpassfilter*, denn nur Gitteranteile mit niedriger (Raum-)Frequenz können das System passieren. Mathematisch bedeutet Tiefpassfilterung also, dass die Fouriertransformation eines Signals beschränkt wird (Abb. 3.7.14). Tiefpassfilter lassen tiefe Frequenzen passieren und blockieren hohe Frequenzen. Feine Details werden also geblockt und es ergibt sich eine Verschmierung bzw. Mittelung im Ergebnis (Anwendung z.B. Rauschunterdrückung).

¹²Bei einem realen Amplitudengitter ist die Transmission in der Objektebene nicht $\sin(k \cdot x)$ sondern $1 + \sin(k \cdot x)$ denn negative Amplituden werden nicht realisiert. Dementsprechend ergeben sich in der Fouriertransformation drei Peaks und einer der Peaks, der ungebeugte Lichtanteil, kann die Blende passieren, so dass das Bild nicht komplett dunkel erscheinen wird.

Ganz entsprechend ergibt sich ein Hochpassfilter, wenn die tiefen Frequenzen geblockt werden. Hochpassfilter lassen also hohe Frequenzen passieren und verstärken somit effektiv alle Bildanteile, die hohe Frequenzanteile beinhalten (insbesondere Kanten).

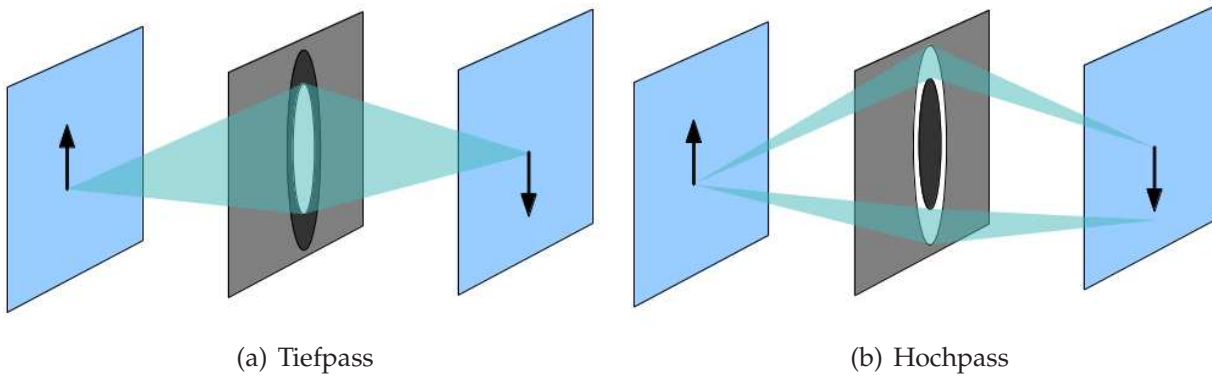


Abbildung 3.7.14: Hoch- und Tiefpassfilter können optisch realisiert werden (hier dargestellt für kohärentes Licht). Hohe Raumfrequenzen, wie sie in feinen Strukturen "enthalten" sind liegen in der Blendenebene weit außen.

Kapitel 4

Transferfunktion

Basierend auf der mathematischen Beschreibung des letzten Kapitels sind wir nun in der Lage, die in der industriellen Bildverarbeitung übliche Beschreibung der Bildqualität, nämlich die sogenannte Modulationstransferfunktion (MTF), zu verstehen und für eine konkrete Applikation anwenden zu können.

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Wie die Abbildungsleistung einer Optik üblicherweise beschrieben wird (optische Transferfunktion).
- Was die Modulationstransferfunktion anschaulich bedeutet.
- Wie die Modulationstransferfunktion der Kombination verschiedener Komponenten berechnet wird.
- Wie die Modulationstransferfunktion eines Bildaufnehmers und typischer Bildaufnahmefehler (Defokus, Verwackeln) berechnet wird.

4.1 Nochmals Faltung und Multiplikation

Ohne uns größere Gedanken über die zugrunde liegende Physik zu machen wollen wir die Optik (z.B. ein Fotoobjektiv) also als ein linear invariantes System annehmen. Wir wissen bereits aus Abschnitt 3.1, dass wir in diesem Fall den Ausgang des Systems durch die Faltung des Eingangs i mit der Punktbildfunktion h

beschreiben können, d.h. $o(x) = i(x) * h(x)$

Außerdem wissen wir, dass die Berechnung auch im Ortsfrequenzraum über den Faltungssatz ausgeführt werden kann. D.h. wir transformieren $i(x)$ und $h(x)$ und erhalten dann (vgl. Gl. 3.29)

$$O(u) = I(u)H(u) \quad (4.1)$$

$H(u)$ ist die also die Fouriertransformierte der Punktbildfunktion $h(x)$ und wird als optische Transferfunktion (OTF) bezeichnet, Der Betrag von H wird als Modulationstransferfunktion, kurz MTF bezeichnet. (Allgemein, also systemtheoretisch, wird H "Übertragungsfunktion" genannt.).

Um die Bedeutung der MTF anschaulich zu verstehen denken wir uns die Abbildung eines Kosinusgitters der Raumfrequenz u_0 . D.h. wir bilden das Gitter $1 + \cos(2\pi u_0 x)$ ab. (Der zusätzliche Konstantanteil "1" ist notwendig weil der Kosinus von -1 bis 1 läuft und wir keine negativen Amplituden zulassen wollen.)

Wir wissen bereits, dass Sinus- bzw. Kosinusschwingungen Eigenfunktionen des linearen invarianten Systems sind. Wir erwarten also, dass wir am Ausgang des Systems ebenfalls eine Kosinusschwingung mit der grundsätzlichen Form $\cos(2\pi u_0 x)$ erhalten. Allerdings wird der Kontrast dieser Schwingung in der Regel verringert sein, das Signal wird beim Durchgang durch das passive optische System gedämpft¹.

In der Ortsfrequenzebene besteht unser Kosinus aus zwei Delta-Impulsen und einem konstanten Anteil

$$\text{FT}[\cos(2\pi u_0 x)] = 1 + \delta(2\pi(u - u_0)) + \delta(2\pi(u + u_0)) \quad (4.2)$$

Durch das System werden Terme der Form Gl. 4.2 unterschiedlich stark abgeschwächt. Der Abschwächungsfaktor ist gerade die MTF, also der Betrag von $H(u)$.

Für typische Abbildungssysteme ist die MTF eine stetig abfallende Funktion (siehe z.B. Abb. 4.1.1). Daraus ergibt sich, dass höhere Ortsfrequenzen im Vergleich zum Konstantanteil ($u = 0$) stärker abgeschwächt werden. In erster Näherung

¹Aktive optische Systeme, z.B. Laserresonatoren oder phasenkonjugierende Spiegel, insbesondere aber nichtlineare Filter der digitalen Bildverarbeitung, können das Signal auch verstärken.

ist die MTF eines beugungsbegrenzten Systems eine linear abfallende Funktion²:

$$MTF(u) \approx 1 - \frac{u}{u_{max}} \quad (4.3)$$

Die Grenzfrequenz ist gerade

$$u_{max} = \frac{1}{\lambda K} \quad (4.4)$$

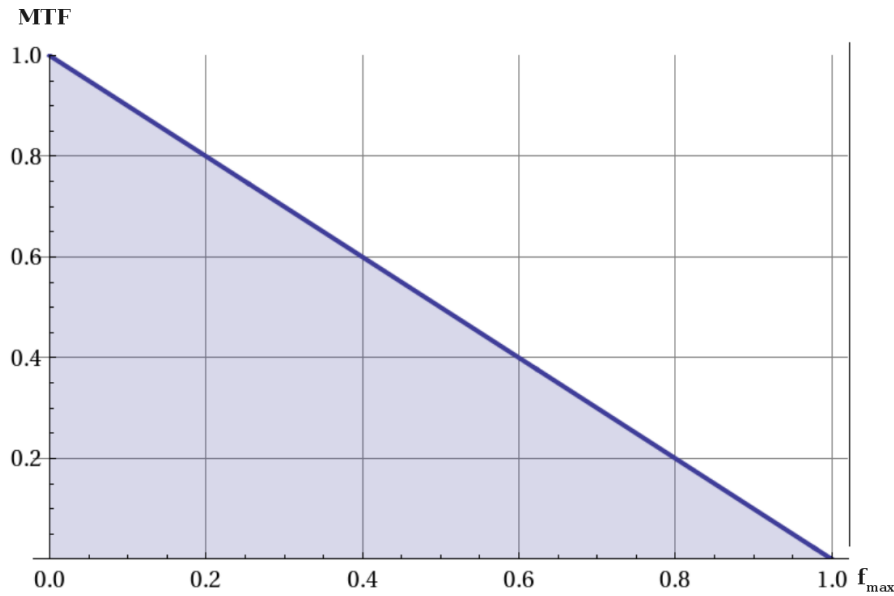


Abbildung 4.1.1: MTF eines idealen (keine Aberrationen) beugungsbegrenzten Abbildungssystems in eindimensionaler (guter) Näherung.

In der Regel wird die MTF so normiert, dass sie für den Konstantanteil 1 wird. Passive Systeme werden zwar auch für diesen Anteil aufgrund von Energieverlusten (z.B. Absorption oder Reflexionsverluste bei den Linsen) immer eine gewisse Dämpfung haben, wir interessieren uns aber bei der Betrachtung des Kontrasts nur für *Verhältnisse* der einzelnen Ortsfrequenzkomponenten zueinander.

Mit dieser Normierung der MTF auf 1 für $u = 0$ wird für unsere angenommene Kosinusschwingung der Ausgang des Systems in der Ortsfrequenzebene

$$O(u) = H \cdot I = 1 + |H(u_0)|\delta(u - u_0) + |H(-u_0)|\delta(u + u_0) \quad (4.5)$$

sein. Im Ortsraum ergibt sich damit für $|H(u)| = |H(-u)|$

$$1 + |H(u_0)| \cos(2\pi x u_0) \quad (4.6)$$

²Die exakte MTF findet sich z.B. in [12]

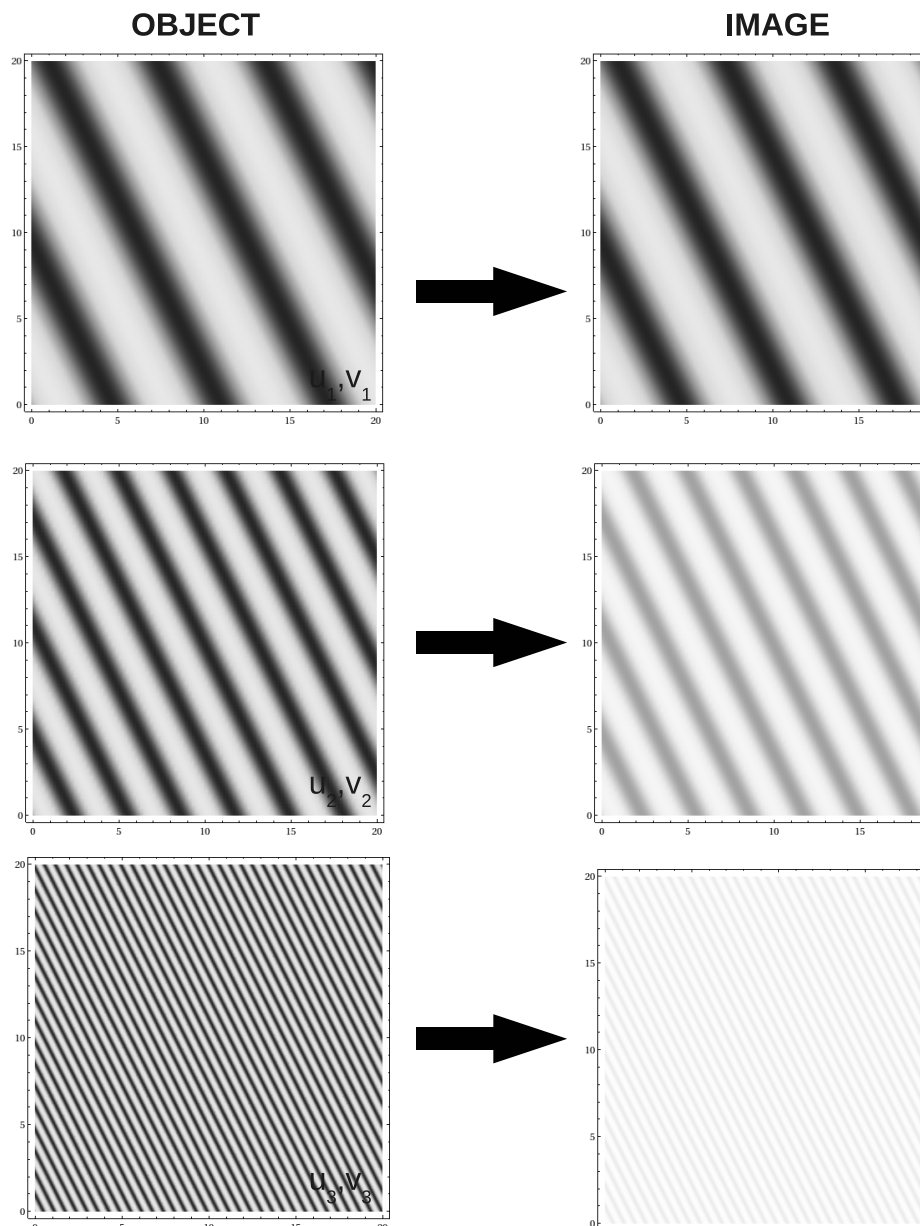


Abbildung 4.1.2: Verdeutlichung MTF Kontrast

Der Kontrast³ (engl.: Modulation) dieser Schwingung ist für das angenommene $|H(u_0)| < 1$ verringert, denn es gilt (für $H := |H(u_0)|$)

$$K := \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{1 + H - (1 - H)}{1 + H + 1 - H} = \frac{2H}{2} = H \quad (4.7)$$

Wir haben so also das wichtige Resultat erhalten, dass der Kontrast einer durch das System übertragenen Kosinusschwingung direkt durch die MTF des Systems bei der Frequenz der Kosinusschwingung gegeben ist. Natürlich gilt dasselbe auch für einen phasenverschobenen Kosinus, also den Sinus.

Die MTF gibt also an, welcher Kontrast bei der Abbildung eines Gitters mit einer bestimmten Raumfrequenz bzw. Gitterperiode im Bild erzielt wird.

Abb. 4.1.2 verdeutlicht nochmals die Zusammenhänge.

Für sehr geringe Gitterfrequenzen ergibt sich so ein Kontrast von nahezu 1 während hohe Frequenzen schlecht übertragen werden und der Kontrast dementsprechend abfällt. Ein Beispiel zeigt Abb. 4.1.3. Die Gitterfrequenz wird in Linienpaaren pro mm (lp/mm) angegeben. So bedeuten 100 lp/mm, dass pro Millimeter 100 Perioden in der Bildebene auftreten bzw. dass die Periodenlänge $10 \mu\text{m}$ beträgt.

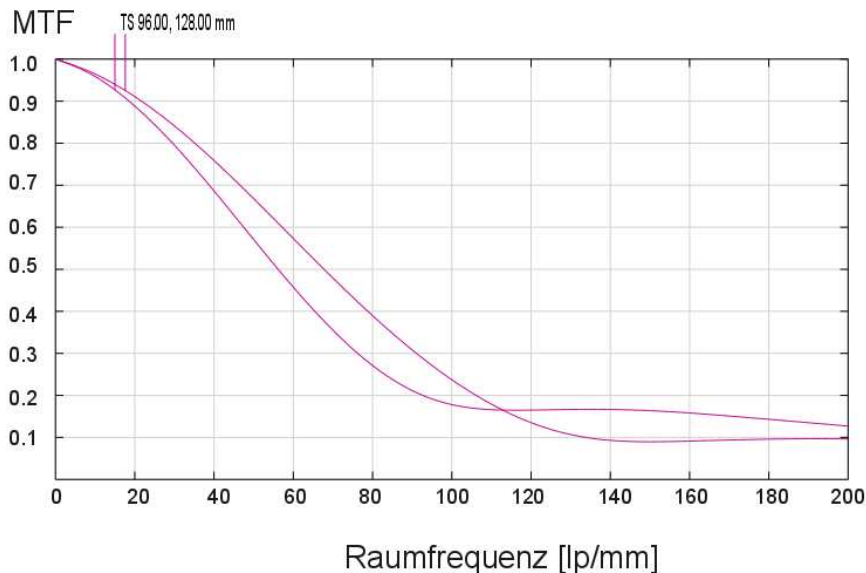


Abbildung 4.1.3: Typische MTF einer Abbildungsoptik, dabei werden zueinander senkrecht orientierte Gitter mit leicht unterschiedlichem Kontrast abgebildet.

Verschiedene Auftragungen für die MTF sind üblich. Gegenüber der bisherigen

³Der Begriff "Kontrast" ist mit etwas Vorsicht zu verwenden denn es gibt durchaus unterschiedliche Definitionen. Im angelsächsischen werden hier verschiedene Begriffe für die verschiedenen Definitionen verwendet.

Darstellung (Kontrast über Raumfrequenz) wird bei Objektiven oft eine Darstellung des MTF über die (Bild-)Feldkoordinate dargestellt denn natürlich hängt die Abbildungsleistung eines Systems meist von der Position im Bildfeld ab. In diesem Fall geben die Kurven dann jeweils die MTF für vorher definierte Raumfrequenzen (z.B. 50 lp/mm) an. Zu beachten ist auch, dass jeweils zwei Kurven für verschiedene Gitterorientierungen ("sagital" und "tangential") dargestellt sind. D.h. je nach Gitterorientierung kann sich durchaus ein anderer Kontrast im Bild ergeben. Asymmetrische Punktbildfunktionen, wie sie z.B. bei Koma auftreten machen dies anschaulich. In diesem Fall ist es klar, dass es einen starken Unterschied macht, ob eine (periodische) Struktur entlang der langen Komaausdehnung (Schweif) ist oder senkrecht hierzu.

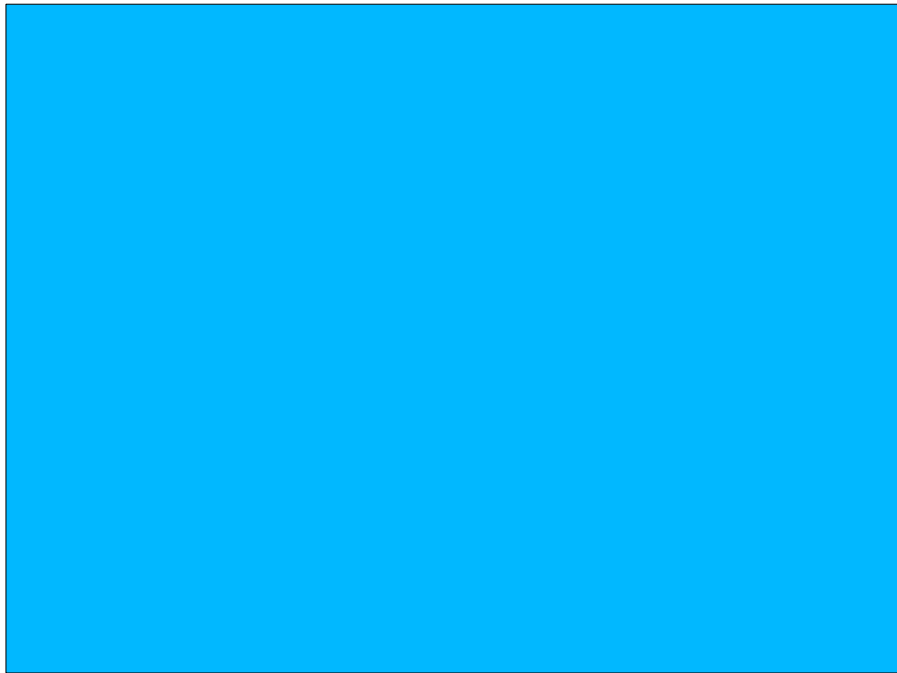


Abbildung 4.1.4: MTF in Auftragung über das Feld.

Die Phase der OTF wird auch als PTF bezeichnet. In der Praxis ist sie meist von untergeordneter Bedeutung und wird nur selten benutzt.⁴ Anschaulich gibt sie an, wie stark ein Sinus mit einer bestimmten Frequenz am Ausgang lateral verschoben wird (s. Abb. 4.1.5). Für Systeme, bei denen diese PTF deutlich für verschiedene Frequenzen variiert muss man auch mit erheblichen Abbildungsartefakten rechnen. Eine linear über die Pupille variierende PTF führt zu einer Verschiebung in der Bildebene. Für hochgenaue Positionsbestimmung kann die PTF damit relevant werden.

⁴Solange der durch die MTF gegebene Kontrast größer 0.2 bleibt, ist die PTF auf jeden Fall geringer als $\pi/4$ [13]

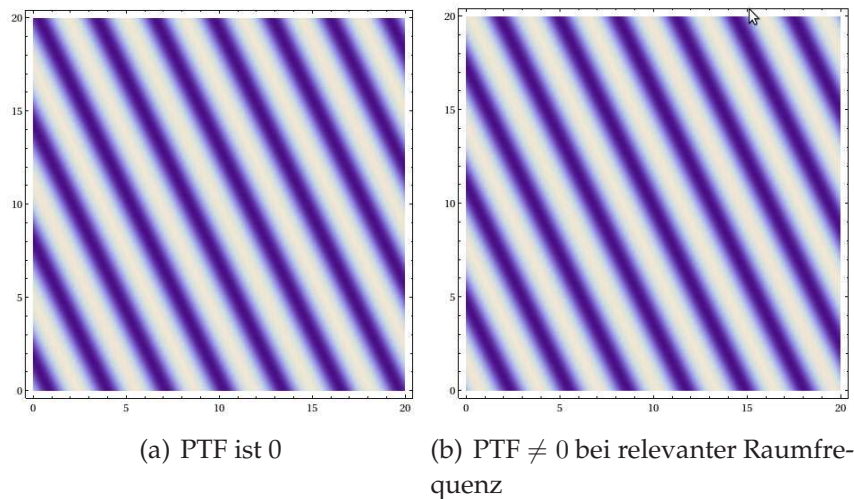


Abbildung 4.1.5: Die Phasentransferfunktion führt anschaulich zu einer Verschiebung des abzubildenden Gitters.

4.2 Zusammenschaltung von MTFs

MTF Kurven sind das Standardmittel zur Beschreibung der Abbildungsleistung von Optiken, aber auch kompletten Bildgebungssystemen (inklusive der Kamera und der elektronischen Verarbeitung). **Bedenken Sie aber: Eine Beschreibung oder Analyse von Systemen mittels der MTF ist nur dann sinnvoll, wenn es sich um lineare, verschiebungsinvariante Systeme handelt!** Nur in diesem Fall wird das Superpositionsintegral bei der Beschreibung des Ausgangssignals (Gl. 3.12) zu einem Faltungsintegral und nur dann macht (eben über den Faltungssatz) eine Übertragungsfunktion Sinn.

Die meisten nicht-trivialen Systeme bestehen aus Teilsystemen. Eine Analyse des Gesamtsystems kann in diesem Fall durch getrennte Analyse der Teilsysteme erfolgen. Die Frage ist dabei nur, wie Sie die Teilergebnisse zu kombinieren haben.

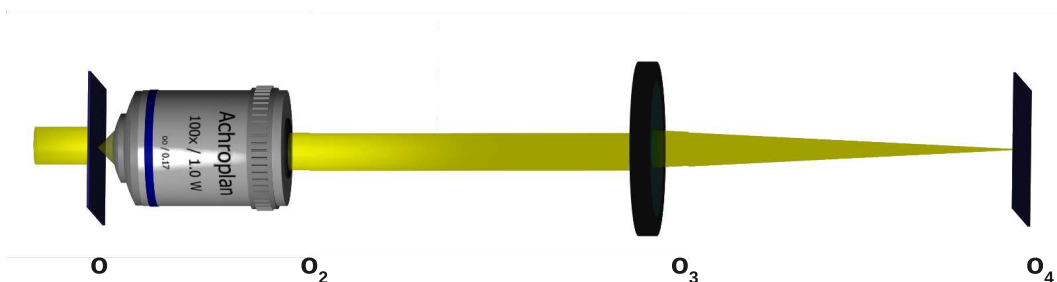


Abbildung 4.2.6: MTF für die Abbildung mit einem Mikroskop

Betrachten Sie das Beispiel in Abb. 4.2.6. Dargestellt ist ein Mikroskop bestehend aus Mikroskopobjektiv, Tubuslinse, Okular und Auge des Beobachters.

Der Ausgang des Teilsystems “Mikroskopobjektiv” ist gegeben durch

$$o_{MO} = h_{MO} * i \quad (4.8)$$

Der Ausgang der nachfolgenden Tubuslinse ist

$$o_{TL} = h_{TL} * o_{MO} \quad (4.9)$$

denn der Input für die Tubuslinse ist der Output des Mikroskopobjektivs. Ganz entsprechend erhalten wir

$$o_{OK} = h_{OK} * o_{TL} \quad (4.10)$$

$$o_{Auge} = h_{Auge} * o_{OK} \quad (4.11)$$

$$(4.12)$$

Und damit also

$$o_{Auge} = h_{MO} * h_{TL} * h_{OK} * h_{Auge} * i \quad (4.13)$$

Das heißt die Gesamtpunktbildfunktion h des Systems ist die Faltung der Teilpunktbildfunktionen

$$h = h_{MO} * h_{TL} * h_{OK} * h_{Auge} \quad (4.14)$$

Daraus folgt mit dem Faltungssatz aber direkt, dass die Gesamttransferfunktion durch die Multiplikation der Teiltransferfunktionen gegeben ist

$$H = H_{MO} H_{TL} H_{OK} H_{Auge} \quad (4.15)$$

Natürlich bleibt die multiplikative Beziehung auch nach Betragsbildung erhalten, so dass Gl. 4.15 auch für die MTF gilt

Ganz allgemein erhalten wir also bei der Hintereinanderschaltung von N Systemen die OTF durch das Produkt der Einzeltransferfunktionen:

$$H = \prod_1^N H_i \quad (4.16)$$

Das Systemverhalten wird also zwar maßgeblich durch die MTF mit der stärksten Abschwächung festgelegt, es sind aber eben wirklich alle Teil-MTFs von Bedeutung, so dass auch die Optimierung eines Systemteils, der schon bereits eine gute MTF aufweist eine weitere Gesamtverbesserung zur Folge hat.

4.3 Einige Beispiele

Wir wollen im folgenden einige für die industrielle Bildverarbeitung wichtige Modulationstransferfunktionen beispielhaft besprechen. Wir starten hierzu mit der *Defokussierung*:

Dazu nehmen wir ein rein geometrisch-optisches Strahlenmodell für den Defokus an (Kreisscheibe), d.h. ein defokussierter Objektpunkt wird zu einer Kreisscheibe mit dem Durchmesser d .

Wir können damit sagen, dass die (inkohärente) Punktbildfunktion h durch

$$h = \text{circ}(x, d) \quad (4.17)$$

gegeben ist.

Für rotationssymmetrische Funktionen geht die Fourier-Transformation in die Fourier-Bessel Transformation über.[10] Und damit

$$MTF(r) \sim \int_0^\infty \text{rect}(r/(D/2)) J_0(2\pi r \rho) \rho d\rho \quad (4.18)$$

$$= 2 \frac{J_1(\pi r D)}{\pi r} \quad (4.19)$$

Näherungsweise kann man den Defokus natürlich auch eindimensional betrachten. In diesem Fall wird aus dem circ ein rect und es ergibt sich als MTF ein sinc. Wenn man den Blurkreisdurchmesser mit B Pixeln annimmt dann wird entsprechend die MTF

$$MTF(u) = \text{FT}[\text{rect}(x/(\Delta x \cdot B))] \sim \text{sinc}(B \cdot u \Delta x) \quad (4.20)$$

mit der Besselfunktion 1. Ordnung, 1. Art J_1).

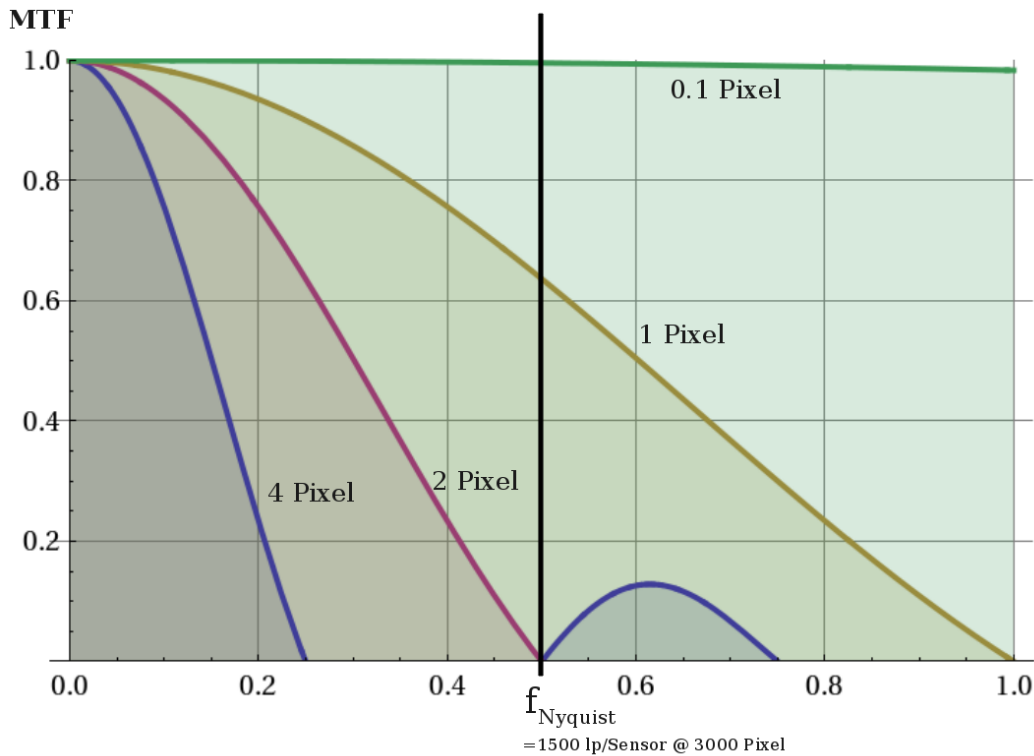


Abbildung 4.3.7: Defokusbedingter Abfall der MTF für einen punktabtastenden Detektor in eindimensionaler Näherung, vgl. Gleichung 4.20. Dargestellt sind Kurven für verschiedene Blurkreisdurchmesser (angegeben in Pixel).

Abb. 4.3.7 zeigt für einige verschiedene Defokussierungen diesen Zusammenhang⁵. Beachten Sie, der Defokusanteil für einen Durchmesser von einem Pixel entspricht dem MTF Abfall aufgrund der endlichen Pixelausdehnung (Gl. 4.23) und muss nicht mehrfach einberechnet werden. Wenn also die MTF für die Defokussierung verwendet wird kann die Pixel-MTF vernachlässigt werden.

Ganz ähnlich gehen wir zur Berechnung der MTF für das “Verwackeln” bei der Bildaufnahme vor. Es ergibt sich in der Bildebene eine eindimensionale Verschmierung, d.h. die Punktbildfunktion ist eine rect-Funktion und entsprechend wird die MTF eine sinc-Funktion:

$$MTF(u) = \text{FT}[\text{rect}(x/\Delta x)] = \text{sinc}(u\Delta x) \quad (4.21)$$

Auch der Füllfaktor eines Pixels hat maßgeblichen Einfluss auf das sich ergebende digitale Bild. Bisher hatten wir nur den Einfluss der Optik mittels der MTF

⁵Eine genauere Rechnung ist in [12] dargestellt.

beschrieben und die eigentlich Bildabtastung mit Delta-Impulsen, also idealen punktförmigen Pixeln angenommen. Natürlich ist das nicht realistisch denn die aktive Fläche wird aus Gründen der Lichteffizienz möglichst groß gewählt.⁶

Es ergibt sich also eine Mittelung des optischen Signals über die aktive Fläche des Pixels und diese hat natürlich auch einen Verschmierungseffekt zur Folge, der zu einer Kontrastreduzierung führt.

Im Sinne eines optimalen Kontrasts wäre also eine rein punktförmige Abtastung zu bevorzugen. In diesem Fall ist die Punktbildfunktion eben ein δ -Impuls und führt daher zu einer MTF mit $MTF(u) = 1$. Da das Rauschen bei Digitalkameras meist die Hauptbegrenzung hinsichtlich der Bildqualität darstellt geht man also eher den umgekehrten Weg und verwendet zusätzlich Mikrolinsen vor den Sensoren um eine möglichst maximale effektive lichtempfindliche Fläche pro Pixel zu erzielen.

Das Verhältnis von lichtempfindlicher Fläche zur Gesamtfläche wird Füllfaktor FF genannt. In einer Richtung ergibt sich für einen Sensor mit Pixelabstand Δx damit

$$h(x) = \text{rect}(x/(FF \Delta x)). \quad (4.22)$$

Die MTF ergibt sich wieder einfach durch Fouriertransformation:

$$MTF(u) = \text{sinc}(FF \Delta x u). \quad (4.23)$$

Für den Grenzfall eines Füllfaktors mit 100%, also einer vollkommenen Ausnutzung der Fläche ergibt sich damit ein merklicher Kontrastabfall für hohe Raumfrequenzen. Objektfrequenzen unterhalb der Nyquistfrequenz werden zwar korrekt erfasst, allerdings mit einem deutlich reduzierten Kontrast. Effektiv reduziert sich also gegenüber einem Sensor mit punktförmiger Abtastung die "Auflösung" merklich.

Dieser Einfluss des Pixels in Zusammenhang mit der multiplikativen Kombination der Teil-MTFs (Gl. 4.15) erklärt auch, warum es durchaus Sinn machen kann, sehr viele Pixel zur Abtastung eines optischen Signals zu verwenden. Man verwendet also mehr Pixel, als man zunächst gemäß der begrenzten optischen Auflösung der Abbildung überhaupt benötigen würde. Ein System, mit gerade

⁶Ein Einsatz von Mikrolinsen und punktförmigen Pixeln ändert hieran nichts, in diesem Fall sind die aktiven Flächen letztlich die Mikrolinsenflächen.

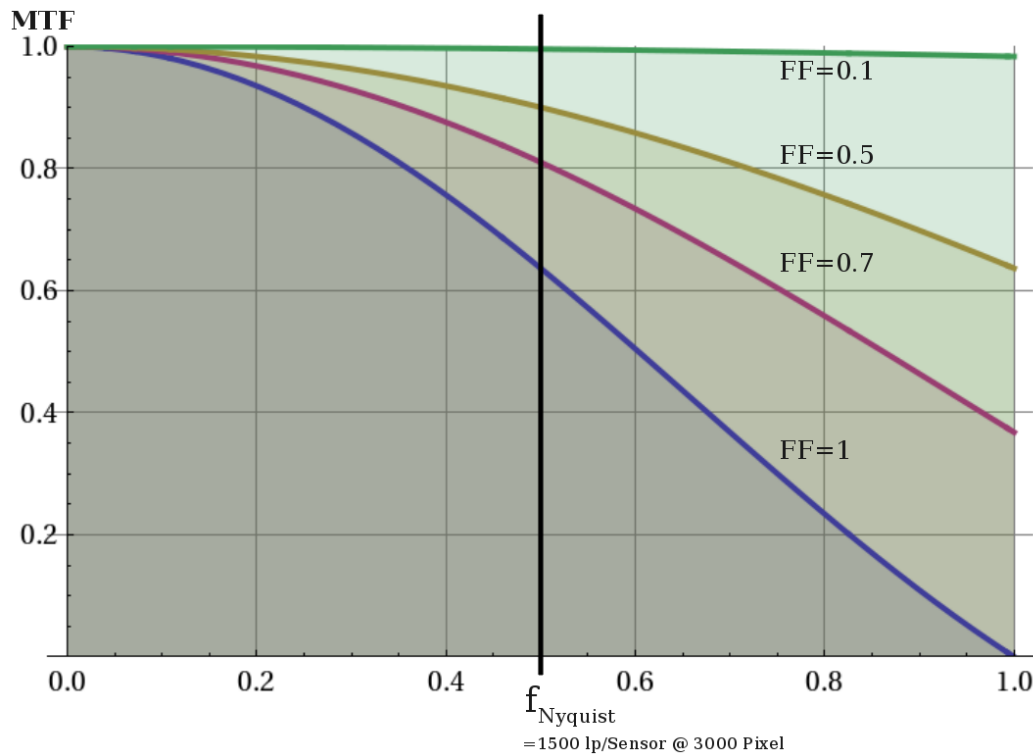


Abbildung 4.3.8: Füllfaktor bedingter Abfall der MTF für einen Detektor in eindimensionaler Näherung, vgl. Gleichung 4.23.

so vielen Pixel wie nach Nyquist notwendig sind, erzielt bei sehr feinen Strukturen aufgrund der endlichen Pixelfläche einen geringeren Kontrast als ein System mit Überabtastung. Besonders häufig und stark wird diese Überabtastung in der Mikroskopie eingesetzt bei der oft viele Pixel eine einzelne optische Auflösungszone aufnehmen.

Die Empfindlichkeit des Pixels muss auch nicht konstant über die aktive Pixelfläche sein sondern kann räumlich variieren, so dass dann eine MTF des Pixels resultiert, die eben nicht durch eine sinc-Funktion beschrieben werden kann.

Bildfehler werden ebenfalls mittels der MTF erfasst. Beim Vergleich verschiedener Objektive ist dies der zentrale Sinn der MTF-Kurven. Aberrationen eines Bildpunktes führen ja direkt zu einer Verschmierung des idealen (delta-förmigen) Punktes mit der Punktbildfunktion $h(x)$. Damit ist klar, dass die MTF sich entsprechend ändert, denn sie kann wieder durch Fouriertransformation von $h(x)$ gewonnen werden. Die MTF ist damit ein sehr sensibles Beurteilungskriterium zur Beurteilung von Aberrationen.

4.4 Grenzen

Solange man sich auf kleine Regionen innerhalb des Felds limitiert liefert die faltungsbasierte Beschreibung bzw. gleichbedeutend das Transferfunktionsmodell, die wir hier vorgestellt haben und die die Grundlage der optischen Abbildungstheorie darstellt in der Regel exakte Ergebnisse.

Probleme treten allerdings dann auf, wenn die relevanten Objektstrukturen sehr klein werden. Grundlage unserer Theorie war die Zerlegung des Objekts in unendlich viele ideale Punkte, die wir (gewichtet mit der Objektfunktion) summiert haben. Die Fouriertransformation des idealen Punkts ist 1. Gleichzeitig sollte das die Feldverteilung des Lichts in der Pupillenebene des Abbildungssystems sein.

In der Praxis haben wir aber eben nicht einen idealen Punkt sondern sehr eng benachbart unendlich viele ideale Punkte. In diesem Fall interferieren die Felder aufgrund der einzelnen Punkte. Interferenz bedeutet hier, dass anstatt der Intensität die elektrischen Felder summiert werden und erst nach der Summation die Intensität durch Quadrieren gebildet wird. Die eng benachbarten Punkte sind dabei (teil-)kohärent. Dies führt dann zu einer komplizierteren Lichtverteilung in der Pupillenebene wie man sie auch in der Praxis beobachtet. Das einfachste anschauliche Beispiel ist ein Spiegel, der kollimiert beleuchtet wird. Eine leichte Spiegelverkipfung führt ganz offensichtlich dazu, dass das Licht in der Pupillenebene nicht mehr symmetrisch verteilt ist (Abb. 4.4.9). Es wird nun also — in Abhängigkeit der Spiegelverkipfung — eine reduzierte numerische Apertur oder Blende genutzt und dementsprechend ist die effektive Auflösung reduziert. Ein Ergebnis, das wir in unserem bisherigen Modell nicht berücksichtigt haben.

Ganz generell kann man sagen, dass die Abbildungstheorie es uns erlaubt, das Lichtfeld in der Bildebene basierend auf dem Lichtfeld in der Objektebene zu berechnen. Aber das Objektfeld in der Objektebene ist *nicht* das Objekt selbst sondern nur die Lichtverteilung *nach* dem Objekt. Der Zusammenhang dieser Lichtverteilung mit dem Objekt ist hochgradig kompliziert wenn die relevanten Objektstrukturen in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts oder darunter liegen.

Eine komplette Berechnung des Bildes beinhaltet also zunächst eine Simulation der Wechselwirkung des Beleuchtungslichts mit der Objektstruktur und die Berechnung des sogenannten Nahfelds nach der Struktur bevor die Abbil-



Abbildung 4.4.9: Eine Spiegelverkipfung führt zu einer unterschiedlichen Ausleuchtung der Pupille und damit zu einer geänderten Abbildung mit einer (in diesem Fall) reduzierten beugungsbegrenzten Auflösung.

dungsmethodik angewendet werden kann.

Für die meisten Bildverarbeitungsprobleme müssen wir diese Details nicht beachten. Bei stark vergrößernden mikroskopischen Anwendungen werden sie aber relevant.

Aber auch bei hochgenauen Positionsbestimmungen können Probleme auftreten. Wie genau die Pupille der Optik ausgeleuchtet wird hängt in komplexer Weise sowohl von der lokalen Objektstruktur als auch der Beleuchtung ab. D.h. es ist für uns nicht vorhersehbar welcher Objektpunkt wie die Pupille des Abbildungssystems ausleuchtet.

Solange die Abbildung ohne Bildfehler erfolgt ist das nur dahingehend ein Problem, dass die lokale beugungsbedingte Auflösung variiert. Sobald aber Aberrationen auftreten — und die in der Bildverarbeitung eingesetzten Objektive sind alle aberrationsbehaftet — können lokale Verschiebungen des Bildpunktes auftreten. Abb. 4.4.10 verdeutlicht das Problem. Wenn z.B. Licht lediglich auf die dargestellte Pupillenzonen fällt, dann führt die dort vorhandene Aberration zu einer minimalen Strahlverkipfung⁷. Diese Strahlablenkung führt dann zu einer Verschiebung in der Bildebene und damit zu einer Fehlmessung der Position. Die Positionsbestim-

⁷Die lokale Aberration in der Pupille können sie als lokalen Phasenkeil betrachten, der analog einem Prisma das Licht ablenkt.

mung wird damit abhängig von der Mikrostruktur des Objekts. Daher lässt er sich auch nicht durch eine Kalibrierung umgehen.



Abbildung 4.4.10: Eine ungleichmäßige Pupillenausleuchtung führt in der Kombination mit Aberrationen des Abbildungssystems zu einer Verschiebung des Bildpunkts.

Je kleiner die Eintrittspupille ist, desto geringer ist in aller Regel der Effekt, aber natürlich führt die geringe Eintrittspupille auch zu einer generell reduzierten Auflösung der Abbildung. Probleme aufgrund ungleichförmiger Pupillenausleuchtung potenzieren sich, wenn Abbildungssysteme geteilte Pupillen verwenden, d.h. unterschiedliche Pupillenbereiche unterschiedliche optische Funktionen erfüllen.

4.5 Nochmal das wichtigste

Die Entstehung digitaler (zweidimensionaler) Bilder wird durch das in Abb. 3.1.2 dargestellte Modell beschrieben. Das Lichtfeld nach dem Objekt wird durch das lineare Abbildungssystem in die Bildebene transformiert.

Wir können das Bild durch die Faltung des Objekts mit der Systemantwort auf einen idealen infinitesimalen Punkt berechnen:

$$i(x) = o(x) * h(x) \quad (4.24)$$

Alternativ kann man aufgrund des Faltungssatzes der Fouriertheorie auch das Ortsfrequenzspektrum von $o(x)$, also $O(u)$ mit dem Ortsfrequenzspektrum von $h(x)$, also $H(u)$ multiplizieren und das Ergebnis zurück in den Ortsraum transformieren:

1. $O(u) = \text{FT}[o(x)]$ und $H(u) = \text{FT}[h(x)]$
2. $I(u) = O(u)H(u)$
3. $i(x) = \text{FT}^{-1}[I(u)]$

Der Betrag von $H(u)$ ist die Modulationstransferfunktion (MTF). Anschaulich gibt sie an, wie stark der Kontrast des Bildes eines Gitters der Periode $1/u$ reduziert wird. Je geringer die Periode bzw. je höher die Raumfrequenz u , desto geringer ist der Kontrast.

Aufgrund der Linearität der Faltungsoperation lassen sich mehrere lineare Filter auf einfache Weise durch einen einzelnen linearen Filter realisieren.

$$o = i * h_1 * h_2 * h_3 = i * h_g \quad (4.25)$$

mit $h_g = h_1 * h_2 * h_3$ bzw. $H_g = H_1 \cdot H_2 \cdot H_3$

Die Gesamt-MTF ist somit das Produkt der MTFs der Einzelsystemkomponenten:

$$H = H_{\text{Optik}} \cdot H_{\text{Sensor}} \cdot H_{\text{Verarbeitung}} \quad (4.26)$$

$$H_{\text{Sensor}} = H_{\text{Pixel}} \cdot H_{\text{Diffusion}} \cdot H_{\text{CTE}} \quad (4.27)$$

$$(4.28)$$

Insbesondere bei kleinen Pixeln ist die Diffusion von Ladungsträgern zu benachbarten Pixeln ein Problem und führt natürlich auch zu einer Kontrastreduktion von feinen Strukturen, die durch $H_{\text{Diffusion}}$ geschrieben wird. H_{HTE} beschreibt die Kontrastverminderung die sich beim Transport der generierten Ladungen ergibt.

Ungleichförmige Ausleuchtungen der Pupille und nicht-verschwindende Phasentransferfunktionen (der Phasenanteil von $H(u)$) führen zu objektabhängigen Verschiebungen des Bildinhalts und daher zur Problemen u.a. bei Positionsbestimmungen.

Das Lichtfeld, das abgebildet wird ergibt sich in erster Näherung einfach als das Objekt selbst. Sobald die abzubildenden Strukturen in der Größenordnung der

Wellenlänge sind, ist der Zusammenhang zwischen Objekt und Lichtfeld nach dem Objekt, kompliziert. In der industriellen Bildverarbeitung wird diese Problematik nicht weiter beachtet.

Für ein beugungsbegrenztes System gilt in guter Näherung

$$MTF(u) \approx 1 - \frac{u}{u_{max}} \quad (4.29)$$

Die Grenzfrequenz, die auch als “Resolving Power” bezeichnet wird, ist gerade

$$u_{max} = \frac{1}{\lambda K} \quad (4.30)$$

Weitere wichtige MTFs:

Defokus:

Allgemeine Aberration: $MTF(u) = |\text{FT}[h(x)]|$

Verwackeln: $MTF(u) = \text{sinc}(N \Delta x u)$.

Pixel-MTF: $MTF(u) = \text{sinc}(FF \Delta x u)$.

Kapitel 5

Laterale Auflösung

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Welche verschiedene Arten der “Auflösung” in der Bildverarbeitung relevant sind.
- Wie man laterale Auflösungen spezifiziert und berechnet.
- Welche lateralen Auflösungen für verschiedene Aufgabenstellungen gewählt werden.
- Aus welchen Anteilen sich die laterale Auflösungsbeschränkung zusammensetzt.
- Welche typischen Bildfehler beim Einsatz von Objektiven zu erwarten sind.
- Welche Pixelgröße und welche Pixelzahl für eine Anwendung zu wählen sind.
- Wie sich kohärente Abbildungen von inkohärenten Abbildungen unterscheiden.

Die Bildqualität, der letztlich mit einem BV-System gewonnenen Bilder hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Wesentlich sind die Abbildungsoptik, die Beleuchtung und natürlich die eigentliche Bildaufnahme durch den Bildsensor. Alle Teilsysteme haben einen Einfluss und sind letztlich zu betrachten. Noch wesentlicher ist aber zunächst exakt zu definieren, was man für eine gegebene Anwendung unter “Bildqualität” konkret versteht. In der Regel wird die Qualität des

Bildes für die nachfolgende computergestützte Auswertung in komplexer Form vorrangig von

- Auflösungen,
- Kontrasten,
- Dynamiken und
- Störsignalen (vor allem Rauschen)

abhängen.

Ein für viele Aufgabenstellungen sehr wichtiger, wenn nicht *der* zentrale Parameter ist dabei die "Auflösung". "Auflösung" ist ein extrem allgemeiner und damit problematischer Begriff. Der Begriff "Auflösung" wird in der Optik von verschiedenen Leuten und anwendungsabhängig völlig unterschiedlich definiert bzw. benutzt. Unterscheiden müssen wir zunächst zwischen Auflösung im Sinne

- der Unterscheidung bzw. Trennung eng benachbarter Objekte (2-Punkt Trennung),
- der Bestimmung der Position eines Punkts oder Linie (Positionsauflösung),
- der Bestimmung einer geometrischen Länge (z.B. Bohrungsdurchmesser),
- der Auflösung einer axialen Messung (Höhen- bzw. "3D"-Messung),
- und der reinen Auflösung eines Bildsensors als Anzahl der verfügbaren Pixel.

Diese unterschiedlichen Auflösungen hängen teilweise miteinander zusammen, sind aber in keinem Fall durcheinander ersetzbar. Als Beispiel soll die Interferometrie betrachtet werden: Ein sehr gutes Interferometer kann Höhenabweichungen auf optischen Flächen mit einer Messunsicherheit von z.B. 10 nm (Peak-to-Valley) messen. Die laterale Auflösung im Sinne einer 2-Punkt Trennung kann aber unter Umständen lediglich 1 mm betragen. Darüber hinaus macht es oft einen erheblichen Unterschied, wie ein näher spezifizierter Auflösungsparameter genau gemessen wurde (z.B. Höhenmessung an Spiegel oder an rauer Oberfläche).

Der Schwerpunkt dieses Kapitels wird die laterale optische Auflösung und die Auflösung des Bildsensors bei inkohärenten Abbildungen sein. Dabei werden

wir zunächst den wichtigsten Fall, nämlich die Auflösung im Sinn der Fähigkeit zur Trennung feiner Details ausführlich besprechen. Für nahezu alle industriellen Bildverarbeitungssysteme muss diese laterale Auflösung beachtet werden. In der Praxis werden oft sehr einfache Abschätzungen verwendet, nicht immer ist dies aber möglich oder sinnvoll und ein gutes Verständnis der die Auflösung beeinflussenden wesentlichen Faktoren ist dementsprechend für viele anspruchsvolle Anwendungen essentiell. Gegen Ende des Kapitels wird in verkürzter Form auf die Positionsauflösung und Effekte bei der kohärenten Abbildung eingegangen.

5.1 Zur Definition von Auflösung

Wenn ein Optiker im Rahmen der Bildverarbeitung von “Auflösung” redet dann ist zunächst in der Regel die laterale Auflösung des zweidimensionalen Bildes im Sinne einer 2-Punkt-Auflösung gemeint. Die Frage ist letztlich: Wenn mein Objekt sehr eng lateral benachbarte feine Strukturen aufweist, kann ich diese noch “auflösen” bzw. (mit ausreichendem Kontrast) getrennt detektieren?

Auflösung in diesem Sinn ist somit die Fähigkeit eines Systems, feine Details zu unterscheiden. Die in diesem Sinne verstandene Auflösung (wie man sie auch immer im Detail definiert, s.u.), hängt entscheidend sowohl von der Optik als auch dem Bildsensor und der Algorithmik ab. Dementsprechend müssen alle Faktoren bei der Beurteilung der Auflösung in Betracht gezogen werden.

Für die Auslegung der Hardware sind zunächst drei Faktoren bei der Frage nach der lateralen Auflösung zu beachten:

1. Können die Strukturen überhaupt theoretisch nach den Gesetzen der Physik noch trennbar sein ?
2. Ist die eingesetzte Optik ausreichend gut korrigiert, um *in der Praxis* die Strukturen noch trennen zu können?
3. Ist der eingesetzte Bildsensor in der Lage, diese Trennung noch zu ermöglichen? Wird also das optisch genierte Bild ausreichend gut abgetastet?

Laien denken üblicherweise beim Begriff “Auflösung” lediglich an den letzten dieser drei Punkte, also die “Kameraauflösung” (ein weiterer ungenauer Begriff)

bzw. die Anzahl der Pixel des Bildsensors. Dieser Einfluss ist für einen idealen monochromatischen Bildsensor vergleichsweise trivial wenn wir die MTF des Pixels vernachlässigen. Aus dem Datenblatt entnimmt man die Anzahl der Pixel und den Abstand einzelner Pixel, den sogenannten *Pixelpitch* p und kann so die Auflösung r_o auf dem Objekt angeben: $p/\beta' = r_o$. Man rastert also einfach das Objektfeld mit der Anzahl der Pixel (z.B. 1600 x 1200 bei einem 2 MPixel Sensor).

Der erste Punkt ist im Sinne einer theoretischen Grenze deutlich interessanter. Wir können ihn dennoch relativ kurz abhandeln. Ein zentrales Ergebnis der Beugungstheorie (siehe z.B. [10]) ist, dass sich bei der Abbildung eines idealen Objektpunkts ein ausgedehnter Bildpunkt, das sogenannte Airy-Scheibchen, mit dem Durchmesser

$$D'_A = 1.22 \frac{\lambda}{NA'} \approx 2.44 \frac{\lambda f'}{D} = 2.44 \lambda K \quad (5.1)$$

ergibt. Den Durchmesser des äquivalenten Bereichs in der Objektebene D_A finden wir dann einfach wieder über den Abbildungsmaßstab, also $D'_A = \beta' D_A$.

Zwei eng benachbarte ideale Punkte führen dementsprechend zu einer Überlagerung der beiden ausgedehnten Bildpunkte. Rayleigh hat definiert, dass wir die Punkte als noch trennbar betrachten sollten, wenn das Maximum des einen Punktbildes gerade in das Minimum des zweiten Punktbildes fällt. Eine genaue Analyse zeigt, dass dann noch ein Kontrast von 15% das Vorhandensein von zwei statt einem Punkt anzeigt bzw. dass das Minimum der beiden Punkte 75% der Intensität der Maxima aufweist. Als *Auflösung nach Rayleigh* haben wir also $r'_A = D'_A/2$:

$$r'_A = 0.61 \frac{\lambda}{NA'} \approx 1.22 \frac{\lambda f'}{D} = 1.22 \lambda K \quad (5.2)$$

Innerhalb dieses Radius findet sich 84% der Leistung des Spots.

Beispiel: Sie benutzen eine sehr gut korrigierte Optik die ein beugungsbegrenztes Abbildungsverhalten bei der verwendeten Blendenzahl von 9 erzielt. Welchen Durchmesser erwarten Sie für die Abbildung eines idealen Punkts?

Lösung: $2r = 2.44\lambda K = 2.44 \cdot 500\text{nm} \cdot 9 = 10.9 \text{ } \mu\text{m}$

Bei der mikroskopischen Bildgebung kann ein zusätzlicher Auflösungsgewinn durch eine hochaperturige Beleuchtungs-NA, NA_{ILL} , erzielt werden (siehe z.B. [23].) Die sich ergebende Auflösung kann näherungsweise durch

$$r'_A = 0.61 \frac{\lambda}{NA + NA_{ILL}} \quad (5.3)$$

Wenn der Optiker nur von “Auflösung” oder “beugungsbegrenzter Auflösung” spricht, dann ist in der Regel dieses theoretische Limit, also die Auflösung nach Rayleigh gemeint.

Beispiel: Sie benutzen ein Mikroskop mit geringer Beleuchtungsapertur. Das Mikroskopobjektiv hat eine numerische Apertur von 0.8. Welche Auflösung können Sie für sichtbares Licht ($\lambda = 500 \text{ nm}$) erzielen?

Lösung: $r = 0.61 \cdot 500\text{nm}/0.8 \approx 380 \text{ nm}$

Dieses sogenannte “Beugungslimit” ist für uns in der industriellen Bildverarbeitung eine unumgehbare theoretische Grenze. Da die numerische Apertur bei Systemen in Luft auf 1 begrenzt ist können wir mit sichtbarem Licht ($\lambda_{min} > 400 \text{ nm}$) in keinem Fall Strukturen kleiner 250 nm auflösen.¹ Für typische Objektive im makroskopischen Bereich ist eine Blendenzahl von $K < 1.4$ schon sehr schwierig zu erzielen und $K=1$ ist kaum zu erreichen.

5.2 Bildfehler

Während es vergleichsweise einfach ist, einen einzelnen Punkt oder ein sehr kleines Objektfeld beugungsbegrenzt abzubilden, ist die in der Bildverarbeitung übliche Abbildung ausgedehnter Objektfelder in der Praxis oft schwieriger zu realisieren. Sowohl aufgrund des Designs als auch aufgrund von Fertigungstoleranzen ergeben sich für reale Objektive damit Bildfehler (*Aberrationen*).

¹Bei periodischen Strukturen kann die minimal auflösbare Periode gemäß Abbe zu 200 nm angenommen werden.

Idealerweise sollten alle Strahlen, die von einem einzelnen Objektpunkt ausgehen sich im zugeordneten (konjugierten) Bildpunkt schneiden. Wäre das Brechungsgesetz, das die Änderung der Strahlrichtung an einer Grenzfläche beschreibt, $n \sin \phi = n' \sin \phi'$, linear, also $n\phi = n'\phi'$, dann wäre diese ideale Abbildung auch ohne Probleme für ausgedehnte Felder möglich. Die Nichtlinearität des Brechungsgesetzes (Sinus) führt aber dazu, dass sich nur Strahlen unter kleinen Winkeln ϕ bzw. ϕ' in einem Bildpunkt schneiden. Je größer die Winkel, desto stärker sind die Abweichungen vom idealen Verhalten.

Damit ist bereits klar, dass im allgemeinen Bildfehler mit zunehmender Apertur (bzw. abnehmender Blendenzahl) stärker werden.

Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten der mathematischen Beschreibung dieser Zusammenhänge, die wir hier aber nicht näher betrachten wollen. Im Sinne einer elementaren Vorstellung genügt es für uns, typische Grundeinteilungen und Zusammenhänge zu verstehen (bzw. zur Kenntnis zu nehmen). Eine etwas ausführlichere Darstellung findet sich in [14].

Man kann die Abweichungen der Strahldurchstoßpunkte in der Bildebene von ihrer eigentlichen Zielposition durch eine Polynomentwicklung beschreiben und die wesentlichen Terme dieser Polynomentwicklung sind Defokus, sphärische Aberration, Koma, Astigmatismus, Bildfeldwölbung und Verzeichnung. Zusätzlich zu diesen "primären (monochromatischen) Aberrationen" ergeben sich höhere Ordnungen, Aberrationen für verschiedene Wellenlängen (chromatische Aberrationen) sowie Kombinationen der monochromatischen mit den chromatischen Aberrationen.

Für ein konkretes Objektiv hängt die Aberration jedes Strahls im wesentlichen davon ab, von welcher Feldposition y er startet und durch welche Position (r, ϕ) der Strahl in der Eintrittspupille er läuft.

In der Feld- und Pupillenabhängigkeit der Stärke der Aberrationen unterscheiden sich die unterschiedlichen Aberrationen.

Die sphärische Aberration ist (neben dem Defokus, der linear mit der Apertur r ansteigt) die einzige Aberration, die auch für einen Objektpunkt auf der optischen Achse, also $y = 0$ auftritt. Dafür ist die Abhängigkeit mit der Radialkoordinate in der Pupille sehr groß ($\Delta y' \sim r^3$), d.h. durch Abblenden (r wird verkleinert) kann die sphärische Aberration extrem reduziert werden bzw. wenn große numerische

Aperturen verwirklicht werden sollen ist der sphärischen Aberration besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Die Verzeichnung hängt dagegen überhaupt nicht von der Pupillenposition ab und verschwindet daher auch nicht durch Abblenden. Sie steigt dafür mit der Feldkoordinate ($\Delta y' \sim y^3$). Üblicherweise kann man (bei rotationssymmetrischen Systemen) zwischen kissenförmiger und tonnenförmiger Verzeichnung unterscheiden. Komplette symmetrische Abbildungssysteme sind frei von Verzeichnung². Beachten Sie, dass diese Verzeichnung aufgrund der Optik nicht mit der perspektivischen Verzeichnung oder einer rein geometrischen Verzeichnung (Objekt verkippt) verwechselt werden darf.

Die Koma hängt stark von der Position der Blende des optischen Systems ab und variiert quadratisch mit der Apertur und linear mit der Feldposition ($\Delta y' \sim y r^2$). Sie hat ihren Namen aufgrund des kometenhaften Punktbilds.

Astigmatismus und Bildfeldwölbung sind miteinander verwandt. Generell steigen sie mit $\Delta y' \sim r y^2$ an. Astigmatismus führt dazu, dass Strukturen je nach Orientierung in verschiedenen Ebenen scharf abgebildet werden. Die Bildfeldwölbung bzw. Feldkrümmung ändert ebenfalls die Fokussierung, allerdings in Abhängigkeit der Feldposition. D.h. weit außen liegende Feldpunkte werden in einer anderen Ebene fokussiert als Punkte nahe der optischen Achse, näherungsweise liegen die scharfen Bildpositionen auf einer Kugelschale. Ohne eine spezielle Korrektur würden die Bildpunkte gerne auf einer Kugelschale liegen.

Bei den chromatischen Fehlern ist zunächst zwischen der chromatischen Längsaberration und der chromatischen Vergrößerungsdifferenz zu unterscheiden. Die chromatische Längsaberration bedeutet schlicht, dass der Bildpunkt in Abhängigkeit von der Wellenlänge in unterschiedlichen Ebenen liegt. Dies ist nicht weiter verwunderlich denn die Brennweite einer Linse hängt natürlich vom Brechungsindex der Linse ab und der Brechungsindex variiert wieder mit der Wellenlänge.

Die chromatische Vergrößerungsdifferenz hat ihren Ursprung ebenfalls in der Brechungsindexvariation. Wesentlich ist aber, dass die Strahlen im Bildraum für

²Dabei ist aber zu beachten, dass auch Objekt- und Bildweite symmetrisch sein müssen, d.h. die perfekte Verzeichnungsfreiheit ist nur für 1:1 Abbildungssysteme möglich. Dennoch haben symmetrisch aufgebaute Systeme auch für 1:x Systeme verbesserte Verzeichnungseigenschaften.

unterschiedliche Feldpositionen unter unterschiedlichen Winkeln die Bildebene treffen. Dadurch ergibt sich rein geometrisch (s. Abb. 5.2.1), dass der Abbildungsmaßstab für den Feldpunkt von der Farbe abhängt. Dies führt bei Farbbildaufnehmern zu Farbsäumen vor allem am Bildrand und bei monochromatischen Sensoren zu entsprechenden Unschärfen. Die einfachste Möglichkeit zur Eliminierung der Farbfehler in der industriellen BV ist natürlich, eine mehr oder weniger monochromatische Beleuchtung zu verwenden.

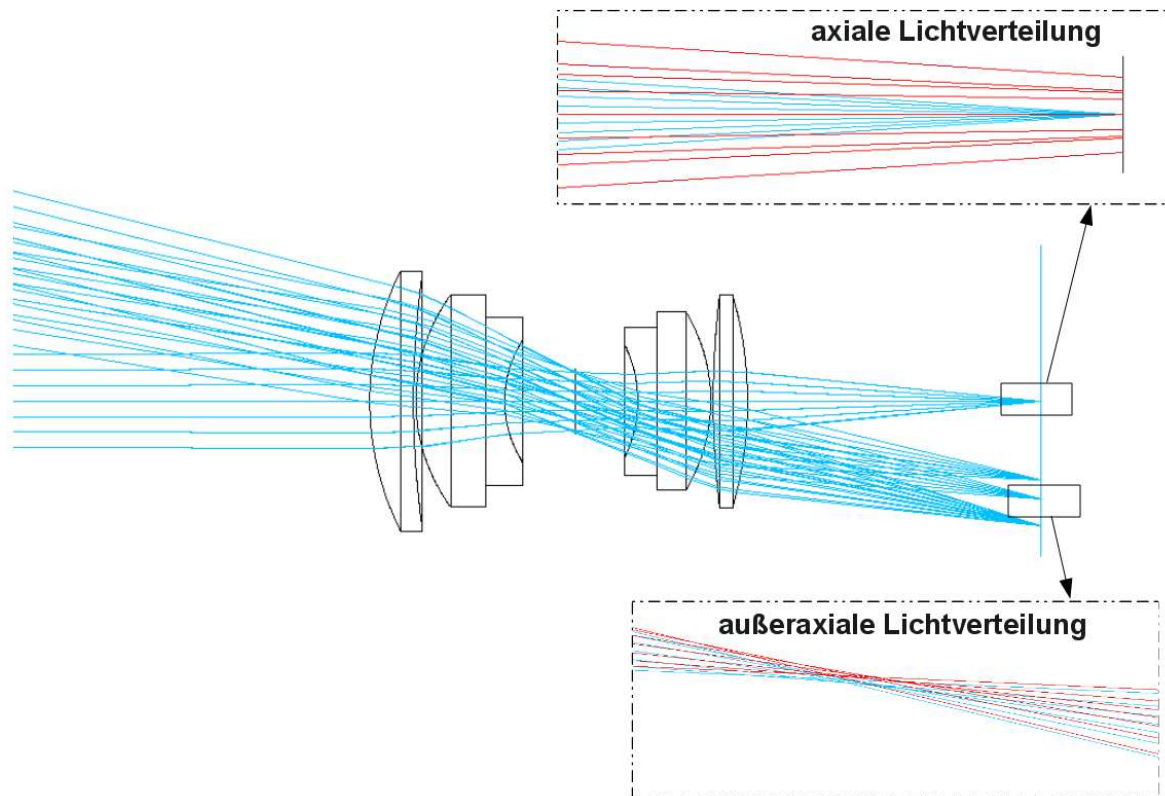


Abbildung 5.2.1: Chromatische Aberrationen dargestellt für zwei verschiedene Wellenlängen. Im Allgemeinen ergibt sich sowohl eine zeitliche, als auch eine axiale Verschiebung des Bildpunkts in Abhängigkeit der Farbe. Die seitliche Verschiebung führt zu einer Variation des Abbildungsmaßstabs mit der Farbe. Die axiale Verschiebung ist der Farbfehler, der sich selbst für die Position $x=y=0$, also die optische Achse ergibt.

Generell kann gesagt werden, dass die Schwierigkeit sowohl im Design als auch bei der Herstellung von Optiken mit zunehmender Lichtstärke und Anzahl abzubildender Punkte steigt. Die Korrektur eines optischen Systems ist also umso problematischer, je mehr Punkte in hoher Qualität und guter Lichteffizienz gleichzeitig abgebildet werden müssen. Daher ist eben die beugungsbegrenzte Abbildung eines Punktes, wie sie zum Beispiel bei einem DVD Abspielgerät notwendig ist, sehr einfach realisierbar, während die ebenfalls beugungsbegrenzte Abbildung von Milliarden von Punkten, wie wir sie in einem Lithografieobjektiv benötigen,

entsprechend schwierig und teuer zu erzielen ist.³

Die einfachste wirklich brauchbare Kenngröße, die angibt, wie komplex ein Abbildungssystem bei einer gegebenen Lichtstärke gewählt werden muss, ist genau diese Anzahl der abzubildenden "Pixel". Wir wollen dabei Pixel als einen kleinen Kreis in der Bild- bzw. Objektebene betrachten. Vornehmer (und auch exakter) ausgedrückt ist die "Anzahl der Pixel" das *Ortsbandbreitenprodukt*. Ein großes Ortsbandbreitenprodukt bedeutet entweder, dass die Bildpunkte sehr klein werden müssen oder aber dass das Bildfeld eine große Ausdehnung aufweist. Beides bedingt einen gewissen Aufwand. Informationstheoretisch kann man sagen: Soll die Information von vielen Objektpunkten ins Bild übertragen werden, dann ist hierzu eine aufwändigere Optik notwendig als bei wenigen Punkten.⁴

Das Ortsbandbreitenprodukt ist also in gewissem Sinn ein einfaches Maß für die notwendige "Komplexität" des optischen Systems, das dieses Ortsbandbreitenprodukt übertragen soll. Für die meisten Bildverarbeitungsanwendungen ist es allerdings nicht geeignet, denn wir erwarten dort üblicherweise, dass in allen Bildbereichen eine ausreichende Auflösung erzielt wird. D.h. maßgeblich ist meist (wenn auch nicht immer) die erzielte Auflösung im am schlechtesten abgebildeten Feldbereich, meist am Bildrand.

In der Bildverarbeitung wird oft von "Megapixel-Objektiven" gesprochen. Allerdings werden damit sehr unterschiedliche Dinge bezeichnet. Es kann damit gemeint sein, dass die optische Qualität ausreichend ist 1 (oder mehr) Megapixel im Sinne einer sinnvollen Information, also eines Ortsbandbreitenprodukts, zu übertragen. Es kann aber auch gemeint sein, dass das Objektiv sinnvoll im Zusammenspiel mit einem Bildsensor mit einigen Millionen Pixeln einsetzbar ist. Wie wir im Abschnitt 5.6 sehen werden ist beides nicht dasselbe und optische Auflösung und Bildsensorauflösung können durchaus um den Faktor 10 differieren.

Die im letzten Abschnitt dargestellte Auflösung nach Rayleigh kann sinnvoll nur verwendet werden, wenn die Bildfehler, die aufgrund des optischen Designs und der Toleranzen bei der Fertigung die Abbildungsqualität verringern, klein gegenüber der Beugungsbegrenzung sind. Die Aberrationen führen dann bei einer Abbildung eines idealen Punktes und unter Vernachlässigung der Beugung

³Natürlich können auch andere Parameter, z.B. ein ausgedehnter Wellenlängenbereich oder hohe Anforderungen an die Verzeichnungsfreiheit, zu erheblichen Schwierigkeiten und damit Kosten führen.

⁴Teilweise wird auch die Area-weighted average resolution verwendet, um das Gesamtauflösungsverhalten eines Objektivs zu kennzeichnen [15].

zu einem Bildpunkt dessen Radius (deutlich) kleiner als die nach Gleichung 5.1 berechnete Punktbildausdehnung ist.⁵ Für relativ weit ausgedehnte Objektfelder und hohe Lichtstärken ist das mit preisgünstiger Optik in der Regel nicht zu erreichen.

Andererseits werden die meisten hochwertigen Objektive beugungsbegrenzt, wenn man genügend abblendet ($K > 8$). Für große Blendenzahlen K , also eine geringe Öffnung des Systems bzw. achснаhe Strahlen durch das System erzielen viele Systeme somit eine beugungsbegrenzte Abbildungsqualität (Gl. 5.1). Für die meisten Objektive gilt weiterhin, dass die beste Abbildungsqualität nicht bei der geringsten Blende erreicht wird. Ein besseres Bild erhält man meist, wenn die Blende um 2..3 Stufen zugezogen wird. Die beugungsbegrenzte Auflösung (und natürlich die Lichtstärke) wird dabei zwar reduziert, aber die geometrischen Aberrationen werden stärker reduziert.

Wenn die Aberrationen ausschlaggebend werden, dann können wir als Beurteilungskriterium für die Bildqualität den Radius des Bildpunkts bei der Abbildung eines idealen Punkts verwenden. Üblicherweise wird der Radius in diesem Fall im Sinne eines RMS (root-mean-squared) Radius verwendet (siehe z.B. Abb. 5.2.2).

5.3 Vignettierung

Abb. 2.3.10 zeigt ein Phänomen, das als *künstliche Vignettierung* bezeichnet wird. Strahlen, die von einem außeraxialen Objektpunkt kommen werden teilweise von Blenden absorbiert und erreichen so nicht die Bildebene. Als Resultat ergibt sich für diese Punkte eine verminderte Bestrahlungsstärke in der Bildebene.⁶

Dieser Effekt ist teilweise gewollt und wird vom Designer des Objektivs berücksichtigt. Generell ist es schwierig bei vertretbaren Kosten Objektive mit hoher Lichtstärke, großem Feld mit hervorragender Abbildungsqualität zu realisieren. Je weiter die Blende des Systems geöffnet wird, desto mehr Strahlen

⁵Für den sogenannten Wellenfrontfehler (gemessen z.B. mit einem Interferometer) der Optik ergibt sich dann ein Peak-to-Valley Wellenfrontfehler kleiner ein Viertel der Wellenlänge ist[7]

⁶Zusätzlich wird die effektive numerische Apertur für diese Strahlen reduziert und damit die beugungsbedingte Unschärfe vergrößert. (Dieser Effekt ist allerdings in der Regel ohne praktische Bedeutung da die aberrationsbedingte Bildunschärfe für außeraxiale Bildpunkte bei den meisten Objektiven und Anwendungen der ausschlaggebende Anteil für die Bildverschlechterung ist.

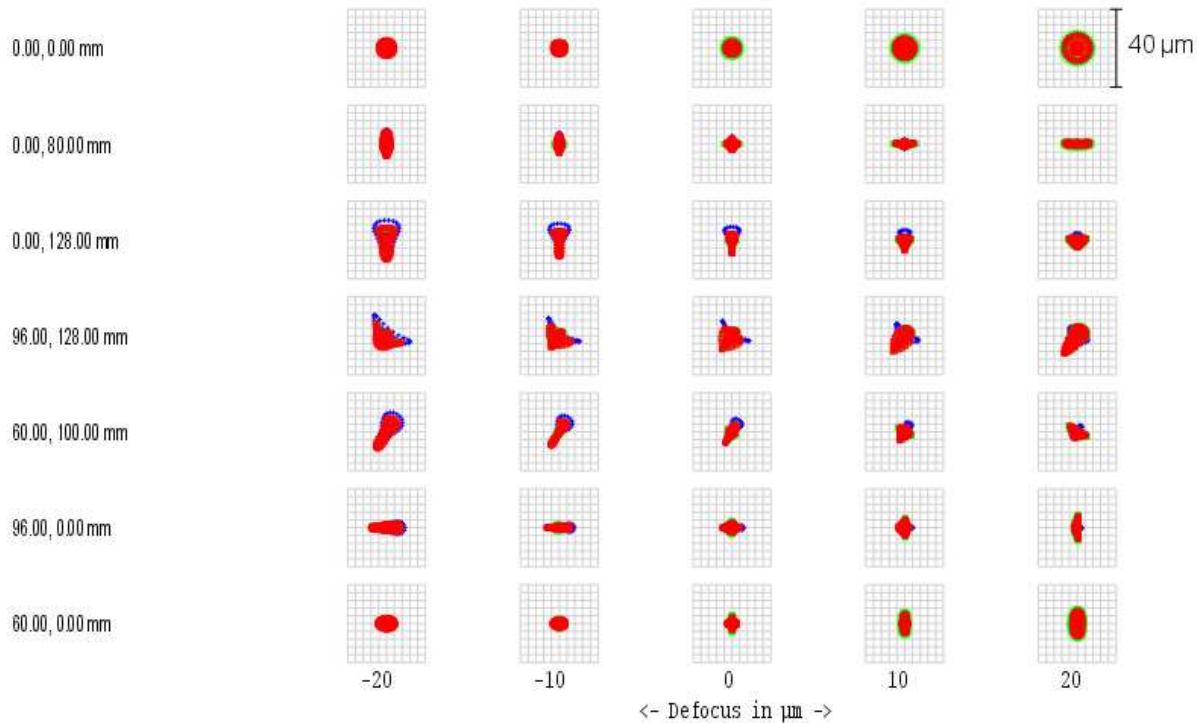


Abbildung 5.2.2: Beispielhafte Variation des Spotbilds bei der Abbildung idealer Punkte in Abhängigkeit der Feldposition (Zeilen) und der Fokussierung (Spalten).

führen zur Bildentstehung. Es ist dementsprechend schwierig bei offener Blende alle Strahlen, die von einem Objektpunkt ausgehen auch wieder in einem Bildpunkt zu bündeln. Die künstliche Vignettierung hilft hier denn es werden Strahlen ausgeblendet. Diese können somit nicht zu einer Unschärfe des Bildpunkts führen. Das Bild bleibt trotz geöffneter Blende akzeptabel. Wird die Blende deutlich geschlossen dann ergibt sich keine künstliche Vignettierung weil das Strahlbündel sowieso von der Blende des Systems deutlich beschnitten ist. Die künstliche Vignettierung hilft so also auch bei weit geöffneter Blende noch eine gute bis akzeptable Bildschärfe im gesamten Feld zu erzielen. Ohne sie wäre oftmals nur das Zentrum des Bilds scharf.

Auch wenn ein Objektiv keine künstliche Vignettierung aufweist ergibt sich automatisch eine Vignettierung, die sogenannte *natürliche Vignettierung*. Die Bestrahlungsstärke in der Bildebene variiert mit dem Bildwinkel ω' hierbei gemäß (s. Abb. ??)⁷

$$E(\phi) = E(0) \cos^4 \omega' \quad (5.4)$$

über das Feld.

⁷Der Bildwinkel ist für ein dünnes System gleich dem Feldwinkel im Objektraum.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt in der Verkipfung des Hauptstrahls gegenüber der Objekt- und Zielebene um den Winkel ϕ sowie der Abnahme der Intensität aufgrund der Energieerhaltung mit dem Abstand zum Quadrat. Eine detaillierte Behandlung findet sich z.B. in [8]. Der Effekt ist natürlich vergleichsweise stark bei Weitwinkelobjektiven aufgrund der sich dort ergebenden starken Winkel.

Die Korrektur der sich aufgrund der Vignettierung ergebenden inhomogenen Bestrahlungsstärke erfolgt üblicherweise per Software (Normierung durch ein "leeres" Grundbild). Dies ist ohne Probleme möglich, wenn genügend Dynamik und ein genügend hohes Signal-Rausch-Verhältnis vorliegt. Es ist natürlich auch möglich durch geeignete optische Filter vor der Bildaufnahme den Effekt auszugleichen, hierbei wird dann aber natürlich ein Teil der sonst nutzbaren Lichtmenge eliminiert.

5.4 Modulationstransferfunktion

Obwohl der RMS-Radius eines Bildpunkts für die Beurteilung sehr wertvoll ist (s.u.) wird er leider für die meisten Optiken nicht angegeben. Stattdessen werden fast alle detaillierten Angaben zur Auflösung optischer Systeme anhand der *Modulationstransferfunktion* (MTF), die wir im vorangegangenen Kapitel näher untersucht haben, vorgenommen. Dabei zeigt sich, dass die MTF sehr deutlich auf Aberrationen reagiert, so dass eine Betrachtung der MTF sehr gut zeigt, ob ein System näherungsweise beugungsbegrenzt ist oder nicht.

Im Gegensatz zu der Analyse der Abbildung eng benachbarter Punkte wird dabei die Abbildung periodischer Liniengitter betrachtet. Zur Erinnerung: Als Maß für die Qualität des Bildes des Liniengitters wird der Kontrast $K = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$ (Gl. 4.7) verwendet und die MTF trägt den jeweils erzielten Abbildungskontrast über der Frequenz des Gitters auf.

Natürlich hängt der Kontrast bzw. die MTF von der Einstellung bzw. Verwendung der Optik ab denn die Aberrationen variieren mit diesen Parametern. Für verschiedene Arbeitsabstände oder Blendeneinstellungen wird man also unterschiedliche MTF-Kurven erhalten.

Da die Aberration auch mit der Position im Feld variiert bekommt man

entsprechend auch unterschiedliche Kurven für die unterschiedlichen Feldposition. Aus diesem Grund ist eine weitere Darstellung der MTF sehr gebräuchlich (Abb. 5.4.3). Hierbei wird über das Feld aufgetragen, welcher Kontrast bei einer ganz bestimmten Raumfrequenz (z.B. 50 lp/mm) erzielt wird.

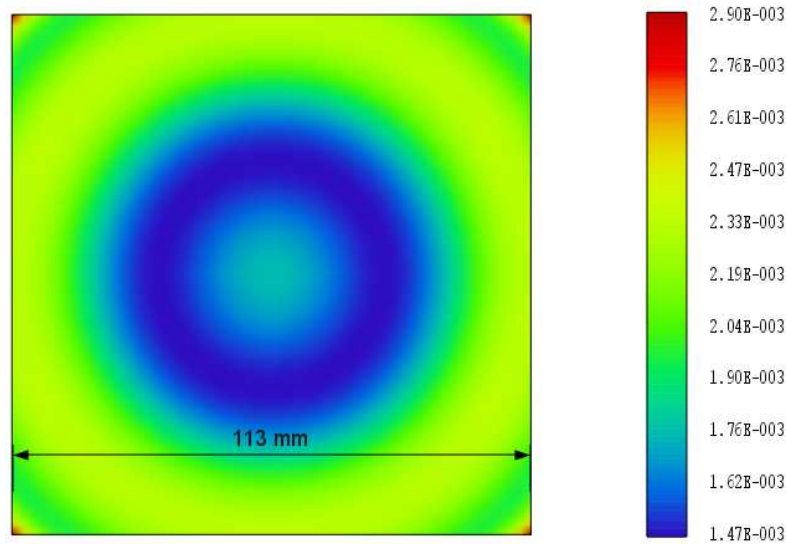


Abbildung 5.4.3: Variation der MTF über das Feld. Am Rand ist die MTF geringer als in zentralen Bereichen.

Als MTF-basierte Auflösung wird oft die Grenzfrequenz verwendet, bei der der MTF Kontrast (über das relevante Feld) noch 10% oder 30% beträgt, also die kleinste Gitterperiode, die noch mit 10% bzw. 30% Kontrast abgebildet wird.

Die MTF ist sicher das Mittel der Wahl zur Beurteilung, wenn periodische Strukturen abgebildet werden sollen. Dies ist aber in der industriellen Bildverarbeitung eher selten der Fall. Die weite Verbreitung der MTF rührt daher, dass wir mit ihr sehr einfach die Kombination von verschiedenen Teilsystemen (vgl. Gl. 4.15) analysieren können

Es sei aber hier davor gewarnt, die Auflösung nach Rayleigh einfach mit der MTF basierten Auflösung gleichzusetzen. Bei der Abbildung aperiodischer Objekte werden gleichzeitig viele verschiedene Raumfrequenzen durch die Optik übertragen und dementsprechend kann ein einzelner MTF-Wert eben nicht die Qualität des sich ergebenden Bilds sinnvoll beschreiben. So kommt es, dass teilweise erhebliche Diskrepanzen bei MTF-basierter Bildbeurteilung und anderen Auflösungsbeurteilungen zustande kommen (siehe z.B. [16]). Bei einer (oft notwendigen) heuristischen Umrechnung von MTF-basierten in Spotradius-

basierten Maßzahlen macht man also immer einen (anwendungsabhängigen) mehr oder weniger starken Fehler.

Bei “normalen”, ausgewogenen Optiken ist die MTF für sehr geringe Ortsfrequenzen (< 10 lp/mm) nahe 1. Unstetigkeiten in der MTF können für verschiedene Auswertelgorithmen zu Problemen führen. Idealerweise ergibt sich von tiefen zu hohen Raumfrequenzen ein monotoner und kontinuierlicher Abfall der MTF.

Natürlich ist insgesamt ein möglichst hohes Kontrastniveau zu wünschen. D.h. eine Linse die über alle Ortsfrequenzen einen Kontrast von lediglich 30% liefert ist sicher nicht erstrebenswert. Stattdessen soll bei möglichst vielen Frequenzen ein möglichst hoher Kontrast erzielt werden. Quantifiziert werden kann diese Aussage durch die Fläche unterhalb der MTF Kurve wenn diese im Sinne einer Kontrastangabe über die Raumfrequenz dargestellt wird. Ein möglichst großer Flächeninhalt wird in diesem Fall wünschenswert. Verschiedene Kenngrößen können basierend auf dieser Idee abgeleitet werden.⁸

Der geforderte Kontrast bei der Abbildung von periodischen Strukturen variiert üblicherweise mit der Raumfrequenz der Struktur. So erfordert das menschliche Sehsystem z.B. bei hohen Raumfrequenzen einen deutlich höheren Kontrast als bei tiefen Raumfrequenzen [7]. Ganz entsprechend muss auch in der maschinellen Bildverarbeitung bedacht werden, dass feine Strukturen schwieriger zu erkennen sind (weniger Pixel) als grobe Strukturen und dementsprechend der Kontrast vergleichsweise hoch sein muss. Die konkrete Variation des geforderten Kontrasts mit der Raumfrequenz ist natürlich algorithmenabhängig.

Darüber hinaus ist auch die geforderte Bestrahlungsstärke von der Raumfrequenz abhängig denn auch hier gilt, dass bei wenigen Pixeln Rauschen schlechter toleriert werden kann als bei vielen Pixeln. Daher kann eine starke Vignettierung oder ein dunkler Bildbereich dazu führen, dass die Abbildungsqualität letztlich nicht mehr ausreichend ist.

Basierend auf der MTF lassen sich verschiedenste Schärfe und Auflösungen definieren. Oftmals wird aus “Auflösung” dann die Raumfrequenz definiert, bei der der Kontrast noch 10% beträgt.[17] Generell kann Ref. [17] als sehr guter Überblick zum Thema MTF empfohlen werden.

⁸Beispiele sind der subjective quality factor, die Heynacher Kennzahlen und das Squareroot Integral (SQRI) [17]

5.5 Vorgehen zur Festlegung von Bildsensorauflösung und Auflösung der Optik

Nach diesen etwas längeren Vorüberlegungen nähern wir uns dem zentralen Punkt dieses Kapitels, nämlich der konkreten Festlegung von optischer Auflösung und Bildsensorauflösung. Entscheidend ist aber zunächst, dass letztlich für die konkrete Anwendung zuerst definiert werden muss, welche Anforderungen an die Auflösung gestellt werden. Ohne eine genaue Definition dieser aufgabenspezifischen Anforderungen ist es unmöglich, gezielt ein passendes Objektiv auszuwählen (oder zu entwickeln).

Diese Definition der Anforderung ist in der Regel alles andere als einfach. Aber erst wenn sie erfolgt ist, kann in einem zweiten Schritt die optische Auflösung und die Bildsensorauflösung festgelegt werden. Folgende Fragen sollten zunächst beantwortet werden:

1. Welche Geometrie haben die kleinsten noch aufzulösenden Strukturen?
2. Handelt es sich um (quasi-)periodische ($\rightarrow$ MTF-basierte Auflösungsbeschreibung) oder eher isolierte Strukturen ($\rightarrow$ Rayleigh-basierte Beschreibung)
3. Wieviele Pixel sollen für die kleinste Struktur verwendet werden? (z.B. 4 Pixel Abstand zwischen benachbarten Strukturen).
4. Wie ist der Kontrast (bei einer perfekten mathematischen Abbildung) dieser Strukturen ? Hierzu sind oft Vorexperimente notwendig da dieser Kontrast stark von der Aufgabenstellung aber auch der Beleuchtung abhängt. Durch ein hochauflösendes Referenzmesssystem (z.B. hochauflösendes Mikroskop) lassen sich oftmals sinnvolle Anhaltspunkte für den in der Anwendung vorliegenden Kontrast finden.
5. Welchen Kontrast kann die bildverarbeitende Anwendung noch sinnvoll akzeptieren.
6. Muss mit Moires (vgl. Kapitel 3) gerechnet werden ?
7. Muss die Auflösung über das gesamte Feld erzielt werden ?

8. Kann zu quasimonochromatischem Licht übergegangen werden (weniger Aberrationen) ?
9. Ist die Blendenzahl aus anderen Überlegungen (Lichtstärke und Schärfentiefe) bereits festgelegt oder kann sie noch frei gewählt werden?
10. Ist der Arbeitsabstand festgelegt oder kann er noch frei gewählt werden ?
11. Gibt es andere Anforderungen an die Optik (insbesondere Baulänge und Gewicht) ?

Grundsätzlich ist zwischen periodischen und isolierten Strukturen zu unterscheiden. An sich ist für die meist auftretenden isolierten Strukturen eine Definition anhand der real vorliegenden Ausdehnung des Punktbilds (z.B. des realen RMS-Wertes des Spotradius) der geeignete Ausgangspunkt. Leider wird dieser Wert in aller Regel von den Herstellern der Optik nicht angegeben und ist meist nur bei eigenen Optikdesigns verfügbar. Wenn allerdings die Blende klein genug gewählt werden kann (Lichtstärke und Beugungsbegrenzung), dann ist das System oft annähernd beugungsbegrenzt und die vorliegende Spotausdehnung kann einfach berechnet werden kann.

Abb. 5.5.4 zeigt die sich ergebende Intensitätsverteilung für zwei benachbarte Punkte in verschiedenen Abständen für ein beugungsbegrenztes optisches System.

Für Objektstrukturen mit einem sehr guten Kontrast (z.B. Loch in Chrommaske) ist in der Regel der sich für $\Delta = 1 \cdot r_A$ ergebende Kontrast im Bild ausreichend. D.h. die Optik kann so ausgelegt werden, dass die kritische Dimension CD in etwa der Auflösung nach Rayleigh (Gl. 5.1) entspricht. Wenn dagegen der Objektkontrast geringer ist, dann ist es sinnvoll, zu $CD = \Delta = 1.5 \cdot r_A$ zu wechseln. Abbildung 5.5.5 zeigt beispielhaft das Verhalten für zwei benachbarte Punkte mit unterschiedlicher Reflektivität ($R_1 = 2R_2$).

Für deutlich aberrationsbehaftete Systeme ist stattdessen der RMS-Radius des Punktbilds zu verwenden. Natürlich hängt die Punktbildform von der konkret vorliegenden Aberration ab, am ehesten macht es aber Sinn, diese durch eine Gaußkurve anzunähern. In diesem Fall ergeben sich bei der Überlagerung die in Abb. 5.5.6 dargestellten Intensitäten.

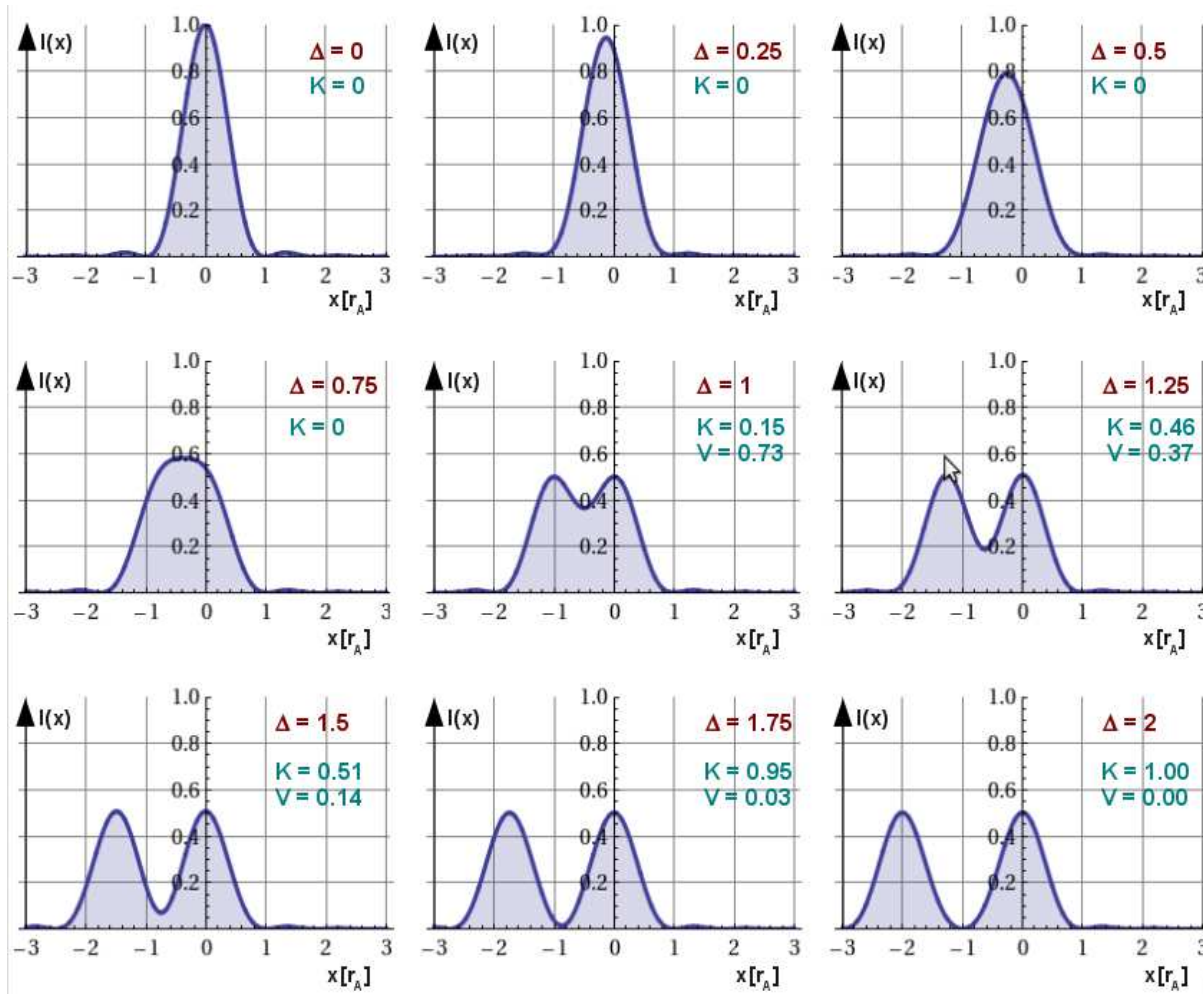


Abbildung 5.5.4: Intensitätsverteilung bei der inkohärenten beugungsbegrenzten Abbildung von zwei benachbarten Punkten. Der Abstand der beiden Punkte ist rot gekennzeichnet und in Vielfachen des Airyradius angegeben. Angegeben sind jeweils Kontrast K und das Verhältnis des Zwischenminimums zum Maximum.

Offensichtlich kann der RMS Spotradius nicht direkt mit dem Airyradius der Auflösung nach Rayleigh gleichgesetzt werden. Für Strukturen mit sehr gutem und schlechtem Kontrast kann als Faustregel

$$CD_{gut} \approx 1.7 \cdot r_{RMS} = 1 r_A \quad (5.5)$$

$$CD_{schlecht} \approx 2.5 \dots 3 r_{RMS} = 1.5 r_A \quad (5.6)$$

angenommen werden.

Bei der Abbildung von Linien ergibt sich gegenüber der Abbildung von Punkten kaum eine nennenswerte Änderung. Abb. 5.5.7 zeigt die sogenannte inkohärente Linespreadfunction [6], beispielhaft für eine numerische Apertur von 0.1 bei einer Wellenlänge von $\lambda = 500$ nm. Der Unterschied zur zum Vergleich dargestellten Airy-Verteilung ist gering, so dass in aller Regel für benachbarte idealisiert dünne

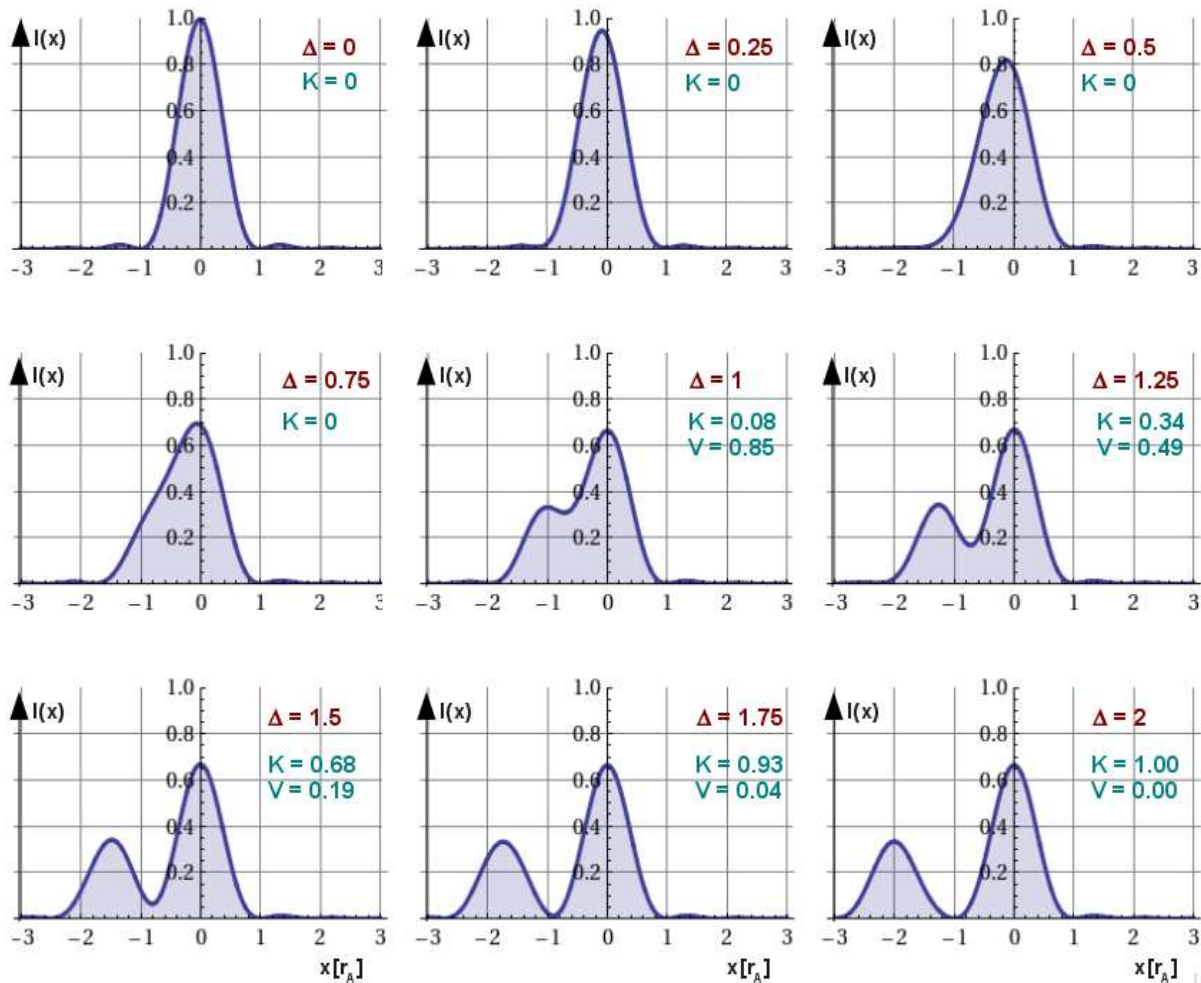


Abbildung 5.5.5: Intensitätsverteilung bei der inkohärenten beugungsbegrenzten Abbildung von zwei unterschiedlich hellen, benachbarten Punkten. Der Abstand der beiden Punkte ist rot gekennzeichnet und in Vielfachen des Airyradius angegeben. Angegeben sind jeweils Kontrast K und das Verhältnis des Zwischenminimums zum Maximum.

Linien ebenfalls die Auflösungsfaustregeln der Gleichungen 5.5 und 5.6 angenommen werden können.

Eine sich ebenfalls oft ergebende Anwendung ist die Abbildung von Kanten. Abb. 5.5.8 zeigt die sich ergebende Intensitätsverteilung (wieder für eine numerische Apertur von 0.1 bei $\lambda = 500$ nm und mit der Vergleichsverteilung nach Airy. Offensichtlich ist die Kantenausdehnung⁹ gering vergrößert gegenüber dem Airy Radius.

Neben der Festlegung der optischen Auflösung ist natürlich auch die Wahl der Pixelgröße des Bildsensors entscheidend. Das Verhältnis von Auflösungsbeschränkung durch die Optik und durch den Bildaufnehmer wird durch

⁹bei einer Definition der Kantenbreite über 10% und 90% der Intensität

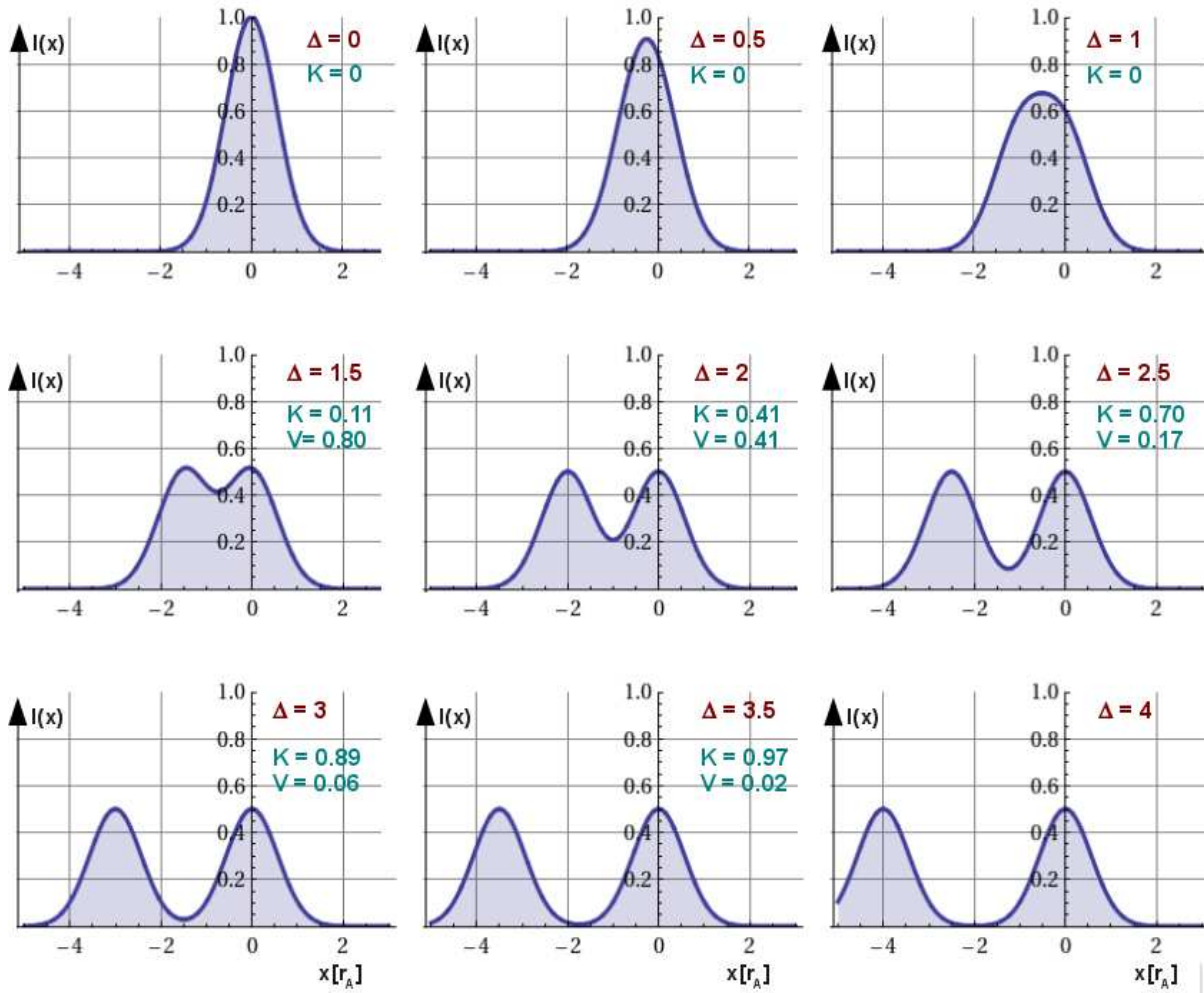


Abbildung 5.5.6: Intensitätsverteilung in der Bildebene bei der Abbildung von zwei eng benachbarten Objektpunkten mit einem aberrationsbehafteten Abbildungssystem. Der Abstand der beiden Punkte ist rot gekennzeichnet und in Vielfachen des Airyradius angegeben.

das sogenannte Q spezifiziert:

$$Q = 2 \frac{r_{Optik}}{r_{Bildsensor}} \quad (5.7)$$

Die Auflösung des Bildsensors wird dabei im Sinne einer Ortsfrequenz definiert, so dass $r_{Bildsensor}$ als das Doppelte des Pixelabstands p angenommen werden kann.

In [12] wird dabei für r_{optik} der Faktor 1.00 statt 1.22 wie in unserer Definition mittels Rayleigh verwendet.¹⁰ Die Auflösung der Optik kann dabei im einfachsten Fall über die Beugungsbedingung (z.B. nach Auflösung nach Rayleigh), die RMS Radius des Punktbilds oder eben mittels der MTF (Grenzfrequenz bei einem

¹⁰Die Unterschiede in der Definition sind für die Praxis wenig relevant, es zeigt sich aber, dass wie meist in der Bildverarbeitung die exakte Definition der Kenngrößen überprüft werden sollte wenn verschiedene Werte miteinander verglichen werden.

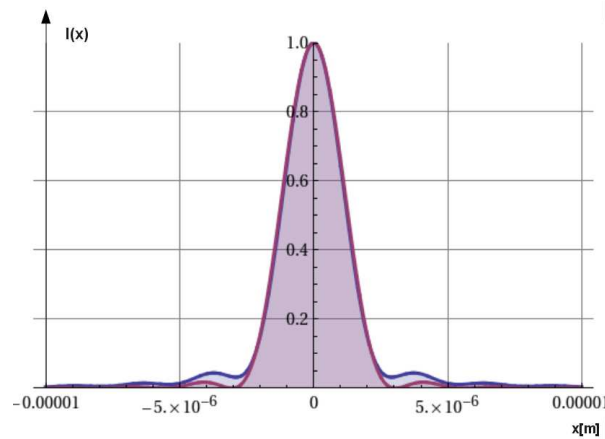


Abbildung 5.5.7: Black-Box Modell

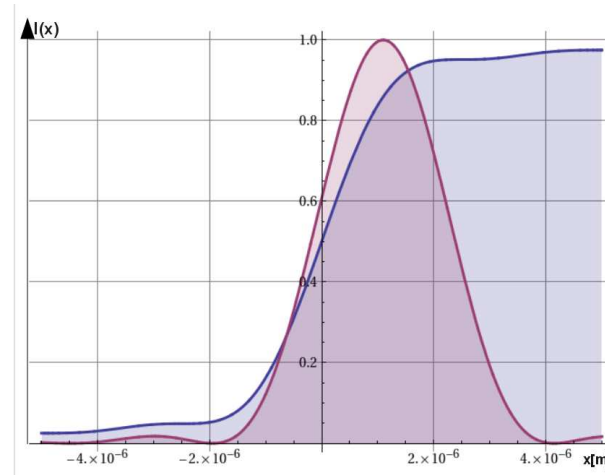


Abbildung 5.5.8: Intensitätsverteilung an einer Kante.

bestimmten Kontrast, z.B. 30%) definiert werden. In diesem Fall ist Q dann das Verhältnis von optischer Auflösung (z.B. Rayleigh) und Pixelabstand und es ergibt sich $Q=1$ wenn ein Pixel der Auflösung nach Rayleigh entspricht. Für ein beugungsbegrenztes System ist Q somit das Verhältnis des Radius des Punktbildes nach Airy und der Pixelgröße p :

$$Q = \frac{r_A}{p} \quad (5.8)$$

Klar ist, dass es meist vergleichsweise wenig Sinn macht, wenn die Auflösungen extrem differieren. Das Punktbild einer schlechten Optik mit 100 Pixeln abzutasten ist meist keine gute Idee, genauso wenig ist es sinnvoll, mittels einer aufwändigen Optik ein Punktbild zu generieren, das deutlich kleiner als ein einzelner Pixel ist. Ein ausgewogenes Design ergibt sich, wenn beide Auflösungen gleich sind, wenn also $Q = 2$ ist. In diesem Fall sampelt man den Radius des Airys mit 2 Pixeln (siehe Abb. 5.5.9. Hochfrequente Muster können mit vergleichsweise gutem Kon-

trast aufgelöst werden. Aliasing wird aber vermieden.

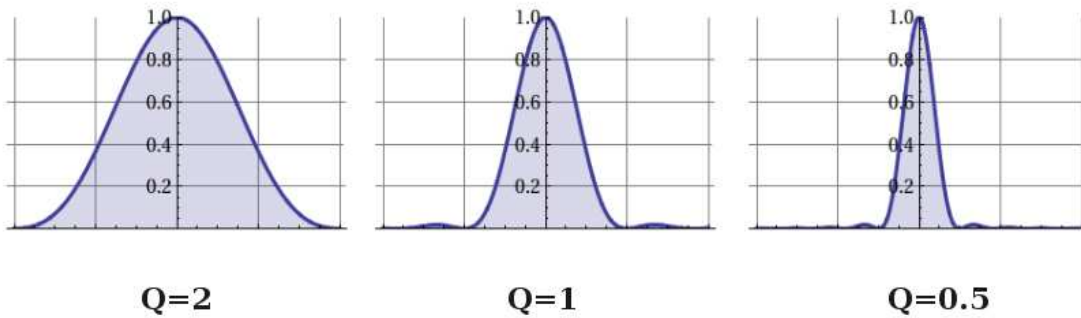


Abbildung 5.5.9: Zur Definition von Q . $Q=2$ bedeutet, dass der Durchmesser des Airy-Punktbilds (Nullstellen) mit 4 Pixeln abgetastet wird.

Ein Q kleiner 2 bedeutet, dass die Optik ein sehr gutes Bildsignal liefert, dieses aber gemäß einer nach dem Samplingtheorem nicht ausreichenden Anzahl von Pixeln abgetastet wird. Es können sich in diesem Fall Moires ergeben (Aliasing). Trotzdem wird dies bei vielen Designs ($Q = 1 \dots 1.5$) in Kauf genommen. Der Gewinn an Kontrast bei feinen Details überwiegt oft die Möglichkeit, dass sich Moires ausbilden. Die konkrete Wahl des Q hängt von den konkreten Anforderungen der Aufgabenstellung ab. Beim Vergleich verschiedener Werte ist aber wieder auf die exakte Definition von Q zu achten.

In den letzten Jahren hat sich allerdings ein Trend zu vielen kleinen Pixeln (Pixelgröße: $1 \dots 1.5 \mu\text{m}$) bei Bildaufnehmern durchgesetzt, so dass zwangsläufig mit großen Q gearbeitet wird. Man muss allerdings klar zwischen verschiedenen Anwendungen und den sich daraus ergebenden Anforderungen differenzieren.

Eine ideale Wahl lässt sich nur erzielen, wenn das sich ergebende Bild (inklusive Beugungseffekte und Aberrationen) für verschiedene Pixelgrößen simuliert (oder gemessen) wird. Abb. 5.5.11 zeigt sehr deutlich, dass es manchmal durchaus Sinn macht, die Pixelauflösung deutlich besser als die optische Auflösung zu wählen, also ein größeres Q zu verwenden. In diesem Fall ergibt sich eine klar verbesserte Darstellung feiner isolierter Details. Dies ist z.B. in der Mikroskopie sehr gebräuchlich, macht aber auch für viele Bildverarbeitungsaufgaben, bei denen sehr feine Details erfasst werden sollen Sinn. In diesem Fall sollte ein Q von 2 bis 3 oder gar 4 gewählt werden.

Es ergeben sich bei der Abbildung auch erhebliche Unterschiede der Abbildungsleistung, je nachdem, wie das abzubildende Objekt konkret aussieht. Bei

periodischen Objekten ist die Definition über die MTF am sinnvollsten, denn diese gibt direkt den Kontrast bei der Abbildung der periodischen Struktur an. Leichte Unterschiede ergeben sich dabei für periodische Binärstrukturen gegenüber den in der üblichen MTF Definition verwendeten sinusförmigen Streifen.¹¹ Aperiodische isolierte Strukturen werden letztlich mit einer verbesserten Qualität abgebildet, denn im Gegensatz zu den periodischen Sinusstreifen ist die MTF nicht nur an einer Stelle, der Grenzfrequenz, sondern über einen weiten Bereich ausschlaggebend. Da für tiefere Raumfrequenzen die MTF meist höher ist, ergibt sich dann ein Gewinn an "Auflösung" bzw. Kontrast. Abb. 5.5.11 zeigt deutlich, dass Strukturen sehr gut sichtbar werden, obwohl der Strukturabstand im Bereich der Auflösung nach Rayleigh liegt. In diesem Fall ist es wesentlich, dass das sich ergebende Bild vergleichsweise hoch aufgelöst abgetastet wird (großes Q). Eine Abtastung mit einer Frequenz oberhalb der Nyquistfrequenz macht also durchaus Sinn wenn feinste Strukturen abgebildet werden sollen.

In Abb. 5.5.10 sind Vorschläge für eine Wahl von Abtastfrequenzen und erforderlichen Auflösungen (MTF, Spotradius) angegeben. Es zeigt sich aber, dass die Ergebnisse stark von der konkreten Anwendung, den Strukturen und der Algorithmik abhängen. Am besten ist die Simulation entsprechender Bilder zur gezielten Auslegung von Auflösungen und Pixelgrößen.

Abb. 5.5.11 zeigt beispielhaft eine entsprechende Simulation für ein Bildverarbeitungsobjektiv (Doppel-Gauß) mit 500 mm Arbeitsabstand und einer Feldgröße von 500 mm. Das Objektiv wurde optimiert für polychromatische Anwendungen (RGB), aber korrekt für die hier simulierte Beleuchtung mit quasimonochromatischem Licht ($\lambda = 600 \text{ nm}$) fokussiert. Die Blendenzahl beträgt 3.

Nach Airy ergibt sich eine Auflösung von ca. $r_A = 2.2 \text{ } \mu\text{m}$. Die Aberrationen führen aber on-axis zu einem RMS Bildpunktradius von $2.7 \text{ } \mu\text{m}$. Daher sollte für weitere Abschätzungen dieser Wert verwendet werden. Das Objekt soll einen guten Kontrast aufweisen daher würde man gemäß Abb. 5.5.10 von einer minimalen kritischen Dimension von $2.7 \text{ } \mu\text{m}$ (bildseitig) ausgehen ($r = CD$). Dabei definieren wir für die Simulationen die kritische Dimension als den Dunkelabstand zwischen den beiden Querbalken des "F".

Entsprechende Simulationsergebnisse für verschiedene Pixelgrößen sind in der oberen Reihe dargestellt. Für die Wahl der Anzahl an Pixeln pro kritischer Dimen-

¹¹Der Kontrast für binäre Strukturen ist gegenüber Sinusstreifen leicht angehoben.

	Optische Auflösung			Pixelgröße
	Airy bzw. Blendenzahl $r_A = 1.22 \lambda K$	r_{RMS}	MTF	
Isolierte Einzelpunkte & Einzellinien  hoher Objektkontrast geringer Objektkontrast	$r_A = 1...2 \text{ CD}$	$r_{RMS} = 1...2 \text{ CD}$	$1/GF_{10} = 2 \text{ CD}$	3 P = CD $Q=1.5 \dots 3$ Oder mehr Pixel bei exakter Positionsbestimmung. stark Rauschabhängig !
	$r_A = \text{CD}$	$r_{RMS} = \text{CD}$	$1/GF_{30} = 2 \text{ CD}$	
Benachbarte Einzelpunkte & Einzellinien  hoher Objektkontrast geringer Objektkontrast	$r_A = \text{CD}$	$r_{RMS} = \text{CD} / 1.5$	$1/GF_{10} = \text{CD}$	3..4 P = CD $Q=3 \dots 4$
	$r_A = \text{CD} / 1.5$	$r_{RMS} = \text{CD} / 2.5$	$1/GF_{30} = \text{CD}$	
(Quasi-)periodische Strukturen  hoher Objektkontrast geringer Objektkontrast	$r_A = \text{CD}$	$r_{RMS} = \text{CD} / 1.5$	$1/GF_{10} = \text{CD}$	3..4 P = CD $Q=3 \dots 4$
	$r_A = \text{CD} / 1.5$	$r_{RMS} = \text{CD} / 2.5$	$1/GF_{30} = \text{CD}$	
Kanten 	$r_A \text{ oder } r_{RMS} = \text{ca. } 1... 10 \text{ Pixel}$ $Q=1 \dots 10$			

Bildsensor MPixel = (Objektfeld / CD)² • 9...16

Abbildung 5.5.10: Wahl von optischer Auflösung und Pixelgröße basierend auf der kleinsten kritischen Dimension. Die grün dargestellten Parameter sind jeweils bei der Auswahl zu bevorzugen. Rote Kennzahlen sollten nur verwendet werden, wenn die anderen Kennzahlen für die jeweilige Anwendung nicht bekannt sind. Die Angabe für Kanten bezieht sich auf eine modellgestützte Positionsbestimmung der Kante.

sion sind offensichtlich etwa 2.7 Pixel ausreichend. Die 1.8 Pixel pro CD sind schon grenzwertig (algorithmenabhängig).

In der unteren Reihe sind Simulationsergebnisse für eine feinere Struktur dargestellt (CD 2 μm statt 2.7 μm). Offensichtlich wären auch diese Strukturen noch auflösbar, wenn genügend Pixel pro CD zur Verfügung stehen. Ist dies aber nicht der Fall, wird die Auswertung problematisch.

Wesentlich bei entsprechenden Rechnungen und Angaben ist eine genaue Definition der kritischen Dimension. Hätte man als kritische Dimension z.B. den Abstand zwischen den Mitten der beiden F Querbalken angenommen, hätten sich die Werte schnell um den Faktor 1.5 geändert.

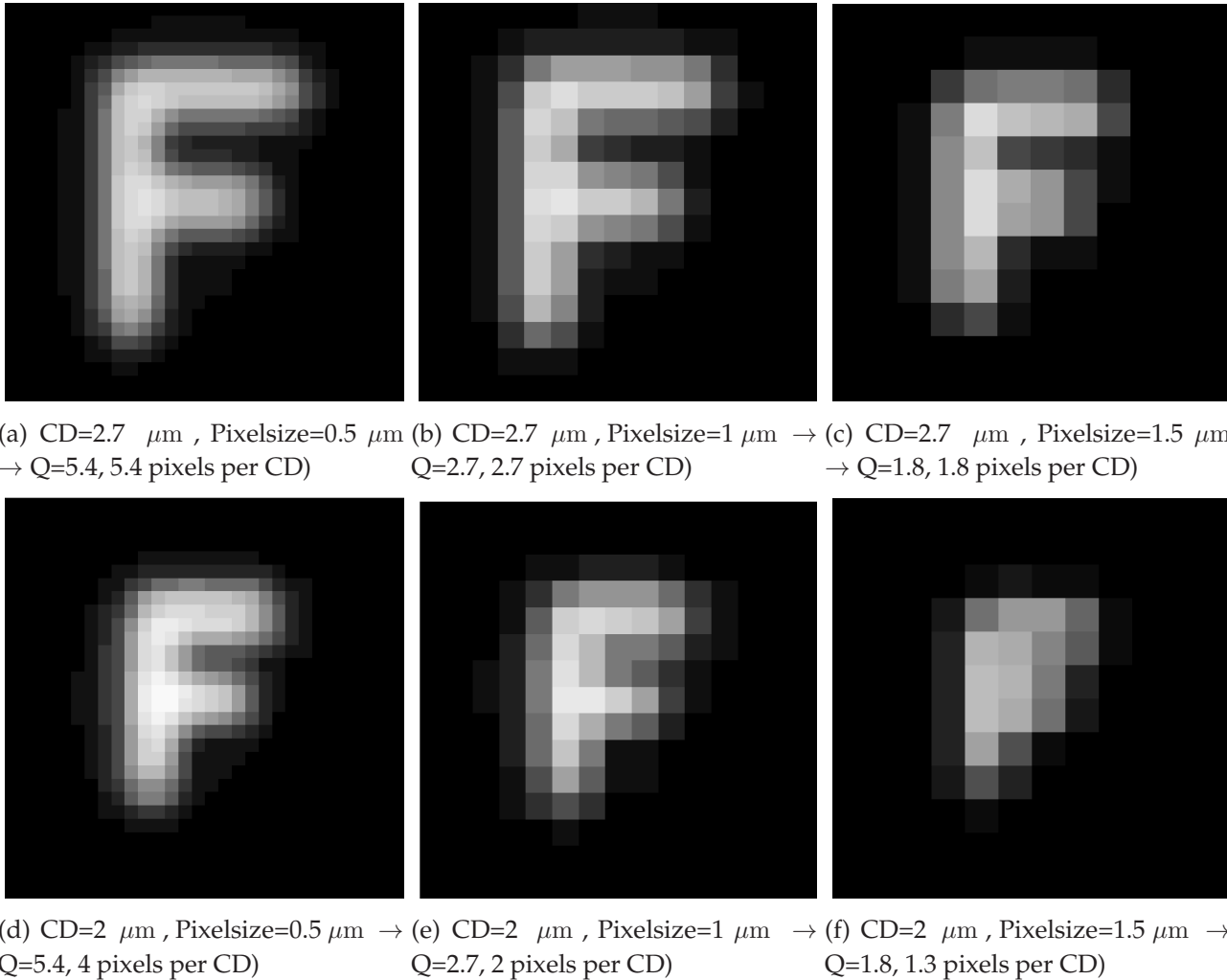


Abbildung 5.5.11: Simulation eines Doppel-Gauß Objektivs mit Arbeitsabstand 500 mm und einem Objektfeld von ca. 250 mm bei monochromatischer Beleuchtung. Die kritische Dimension wird als Abstand zwischen den beiden waagrechten F-Strichen (Dunkelbereich !) angenommen.

Objektseitig entspricht dies im übrigen bei dem System einer kritischen Dimension von $117 \mu m$. Über das gesamte Feld (250 mm) würde sich so eine notwendige Pixelzahl von ca. 33 MPixel ergeben¹². Beachten Sie aber, dass die Ergebnisse für die on-axis Bildgebung gewonnen wurden. Für das Objektiv ergibt sich über das Feld monochromatisch ein Bildpunktradius von bis zu $5 \mu m$ bzw. $18 \mu m$ polychromatisch. Das muss bei einer Auslegung beachtet werden und es hängt davon ab, wo im Feld die feinsten Strukturen zu erwarten sind. Weiterhin sind keine Fertigungsfehler in der Simulation enthalten. Die in Abb. 5.5.11 angenommene Auflösung von $2.7 \mu m$ bildseitig ist also in der Praxis selten so erreichbar.

Die Ergebnisse zeigen aber deutlich, dass eine deutliche Überabtastung mit vielen Pixeln Sinn machen kann und dass man mit den Parametern optische Auflösung

¹² $(250 \text{ mm} / 117 \mu m \cdot 2.7)^2$

und Abtastung (Pixelauflösung) spielen kann, um gegebene Strukturen noch sinnvoll zu erfassen.

5.6 Sensorgröße und Pixelgröße

Eng verbunden mit der Festlegung der optischen Auflösung und Q ist natürlich zwangsläufig die Pixelgröße des Bildsensors und es ist klar, dass die Sensorgröße einen erheblichen Einfluss auch auf die Auslegung der Optik hat: Wenn dasselbe Objektfeld auf einen Sensor mit kleineren Pixeln abgebildet werden soll ist zwangsläufig bei gleichem Objektabstand die Brennweite der Abbildungsoptik reduziert. Bevor wir also die Optik auslegen bzw. auswählen können, muss die Sensorgröße definiert sein.

Generell besteht bei Bildaufnehmern ein Trend zu immer kleineren Sensoren und aufgrund der Massenfertigung entsprechender Sensoren ist die Qualität solcher Sensoren mit kleinen Pixeln inzwischen erstaunlich hoch. Weil die Sensorgröße einen so immensen Einfluss auf das gesamte Abbildungssystem hat, sollte ihre Wahl gut durchdacht werden.

Prinzipiell kann gemäß der geometrischen Optik ein Objektivdesign mit geänderter Brennweite einfach dadurch gewonnen werden, dass alle geometrischen Größen (Linsenradien, Durchmesser, Abstände) mit dem Skalierungsfaktor der Brennweiten multipliziert wird. Gemäß der geometrischen Optik würde sich das skalierte Objektiv mit dem neuen Bildsensor also exakt gleich verhalten wie die ursprüngliche Kombination von Objektiv und Bildsensor und wir könnten bei oberflächlicher Betrachtung Optik und Bildsensorgröße getrennt betrachten.

Zu beachten ist aber, dass sich auch die Toleranzen hinsichtlich der Fertigung und Justage entsprechend skalieren und die Herstellung dadurch deutlich verteuert werden kann. Wenn also auch die Abbildungsfehler entsprechend skaliert werden sollen, also so, dass sie z.B. nach wie vor einem Pixel entsprechen, dann werden die Anforderungen an die Fertigung stark erhöht. Wenn bei der Abbildungsoptik bereits ein Verhalten nahe der Beugungsbegrenzung vorliegt, ist weiterhin zu beachten, dass die Beugungsbegrenzung nicht skaliert, denn die Wellenlänge bleibt natürlich von der geometrischen Skalierung unbeeinflusst.

Kleine Pixel in Verbindung mit den verkleinerten Optiken können hinsichtlich der Abbildungsqualität daher sehr problematisch sein, auch wenn durch die Skalierung natürlich auch der Durchmesser des Bildfelds skaliert wird.

Ein weiteres Problem kleiner Pixel ist das Rauschverhalten. Die Bestrahlungsstärke (Leistung pro Flächeneinheit) ist zwar konstant aber letztlich ist das Signal-Rausch-Verhältnis prinzipiell oft durch die Anzahl der genutzten Photonen pro Pixel begrenzt (vgl. Abschnitt ??).

Bei der Skalierung der Brennweite der Optik führt eine konstante Blendenzahl natürlich gemäß $K = f'/D$ auch zu einer Skalierung der Eintrittspupille. Die Eintrittspupille wird also verkleinert und somit wird die aufgenommene Lichtmenge reduziert. Oftmals kann der Verlust an Lichtstärke nicht toleriert werden. Dadurch werden sehr geringe Blendenzahlen notwendig. Bei Consumerprodukten ergeben sich teilweise Blendenzahlen in der Größenordnung 1,2 bis 1,5. Dies führt dann aber — bei einer brauchbaren Abbildungsqualität — zu entsprechend aufwändigen Optiken. In Kombination mit den erhöhten Anforderungen an die Toleranzen bei der Fertigung kann so der Vorteil der preiswerteren Sensorfläche insgesamt schnell ins Gegenteil verkehrt werden, insbesondere wenn die notwendige Stückzahl für eine entsprechende Produktion nicht gegeben ist. Für Smartphone Kameras werden so teilweise 8 asphärische Flächen verwendet, ein für Produkte mit geringer Stückzahl kaum wirtschaftlich realisierbarer Wert.

Und schließlich ergibt sich noch das Problem, dass bei sehr kleinen Pixeln das optische und elektrische Übersprechen benachbarter Pixel deutlich zunimmt, so dass sich bei Abbildung feiner Strukturen der Kontrast verschlechtert.

Letztlich ist es — trotz teilweise anderweitiger Aussagen — schwierig dieselbe Performance in einer Anwendung mit kleinen Pixeln bei gleicher Pixelanzahl zu realisieren. Der Kostenvorteil beim Sensor und beim Volumen der Optik führt meist zu einer Verringerung der Gesamtabbildungsleistung oder aber zu aufwändigen Optiken. Für die meisten Anwendungen kann in der industriellen Bildverarbeitung daher von Pixelgrößen zwischen $p = 3$ und 7 Mikrometern ausgegangen werden. Die im Consumerbereich üblichen extrem kleinen Pixel im Bereich zwischen 1 und 2 Mikrometern führen bei hohen Qualitätsanforderungen nicht zu einer Kostenreduktion und sind vor allem der dort vorherrschenden starken Bauraumreduktion und weniger strikten Bildqualitätsanforderungen geschuldet.

Das bedeutet aber nicht, dass kleine Pixel generell gemieden werden sollten. Bisher sind wir von einer konstanten Anzahl von Pixeln ausgegangen. Geht man aber von einer konstanten Sensorfläche aus, dann können kleine (und damit viele) Pixel durchaus Sinn machen. Dabei steigt zwar die zu verarbeitende Informationsmenge (Hauptnachteil), die Gesamtauflösung kann aber eben aufgrund der Überabtastung steigen und es ergeben sich keine Probleme mit Moires, insbesondere bei Farbanwendungen.

Letztlich bleibt die Wahl der Sensorgröße und Pixelgröße schwierig und in der Regel ist es sinnvoll, mehrere Varianten der Kombination aus Bildaufnehmer und Abbildungsoptik durchzuspielen.

Wenn die Pixelgröße festliegt kann basierend auf der kritischen Dimension CD der kleinsten aufzulösenden Details direkt bei gegebenem Q der Abbildungsmaßstab berechnet werden (vgl. Abb. 5.6.12):

$$\beta' CD = Q p \quad (5.9)$$

Für $Q=4$ ist der sich ergebende Abbildungsmaßstab in Abb. 5.6.12 dargestellt.

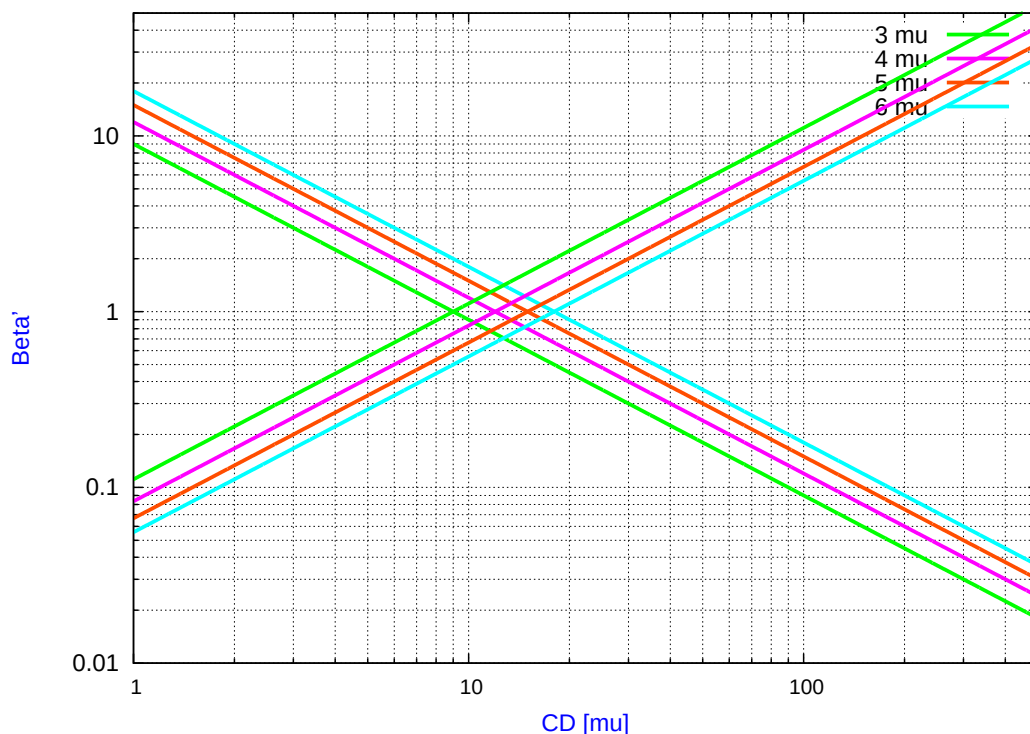


Abbildung 5.6.12: Wahl des Abbildungsmaßstabs bei $Q=4$ für verschiedene kritische Dimensionen der aufzulösenden Defekte bei verschiedenen Pixelgrößen (3 ... 6 μm). $Q = 4$ bedeutet, dass 4 Pixel zum Abtasten der Auflösungsbegrenzung (z.B. Rayleigh Radius) verwendet werden. Bei isolierten Strukturen mit gutem Kontrast werden soll pro Struktur zwischen 2 und 4 Pixel (linear) verwendet.

Beispiel: Sie sollen die Optik eines Spionagesatelits auslegen. Dabei soll $Q=2$ bei $10\ \mu\text{m}$ Pixeln erreicht werden. Der Abbildungsmaßstab beträgt $\beta' = -1 \cdot 10^{-4}$. Welche Auflösung (im Sinne der 2-Punkt-Auflösung) wird am Boden (Erde) erreicht?

Lösung: $CD = 2 \cdot 10\mu\text{m} \cdot 10^4 = 0.2\ \text{m}$

Beispiel: Sie wollen benachbarte Linien auf einem Objekt getrennt detektieren. Der minimale Linienabstand beträgt $50\ \mu\text{m}$. Sie setzen eine Kamera mit $5\ \mu\text{m}$ Pixeln ein. Was müssen Sie hinsichtlich der Auflösung beachten?

Lösung: Gemäß Abb. 5.5.10 fordern wir $r_A = 0.8 \cdot 50 = 40\ \mu\text{m}$ auf dem Objekt. Außerdem fordern wir, dass den $50\ \mu\text{m}$ 3.5 Pixel entsprechen, also objektsseitig einem Pixel $14\ \mu\text{m}$ entsprechen. Damit erhalten wir einen Abbildungsmaßstab von $\beta' = -14/50 = -0.28$. Die Auflösung nach Airy im Bildraum wird daher $40 \cdot 0.28 = 11.2\ \mu\text{m}$. Damit berechnen wir die Blendenzahl zu $K = 11.2/1.22 \cdot 500\text{nm} = 18$. D.h. hinsichtlich der Auflösung müssen wir keine große Blende (kleine Blendenzahl) verwenden (evtl. aber aufgrund der Lichtstärke). Aufgrund der großen Blendenzahl lässt sich mit konventionellen Optiken bei begrenztem Feld auch ohne Probleme die beugungsbegrenzte Abbildungsqualität erzielen. Die Anforderungen an die Abbildung lassen sich also hinsichtlich der geforderten Auflösung einfach erfüllen.

In Abb. 5.6.14 sind Auflösungen verschiedener Optiken für einen typischen 2/3 Zoll Bildsensor ($8.8\ \text{mm} \times 6.6\ \text{mm}$) dargestellt. Dabei wurde gefordert, dass der Kontrast von feinen periodischen Strukturen in 95% des Bildes mindestens 30% betragen muss. D.h. die MTF sollte für praktisch das gesamte Bildfeld größer 30% sein. Dadurch ergibt sich eine Grenzfrequenz, angegeben in Linienpaaren pro mm (lp/mm). Für die Darstellung eines Linienpaares werden nach dem Samplingtheorem (vgl. Abschnitt 3.34) mindestens zwei Pixel (einer hell, einer dunkel) benötigt. In der Praxis wird man aber zur Erzielung eines sinnvollen Kontrast eher 3 bis 4 Pixel wählen. Dann werden einfach die diesem Wert entsprechenden Pixel auf der Fläche von $8.8\ \text{mm} \times 6.6\ \text{mm}$ berechnet.

Wenn also die Grenzfrequenz bei 30% Kontrast z.B. $100\ \text{lp/mm}$ beträgt dann

benötigen wir in horizontaler Richtung $8.8 \text{ mm} \cdot 100 \cdot 4 = 3510$ Pixel und entsprechend in vertikaler Richtung 2640 Pixel und damit insgesamt 9.2 MPixel. Das ganze gilt bei einer Definition über die Grenzfrequenz bei 30% Kontrast und eine Abtastung dieser Frequenz mit 4 Pixeln. Diese Definition ist aufgabenspezifisch bzw. willkürlich.

Dementsprechend werden auch andere Berechnungen zur Umrechnung in MPixel verwendet. Z.B. kann man auch fordern, dass die 30% Kontrast bei $2/3$ der Nyquistfrequenz erreicht werden. Oder dass 10% als Kontrast wesentlich sind. Dementsprechend sind MPixel Angaben sehr problematisch da die Werte — je nach Definition — schnell massiv variieren. Die Herstellerangaben in den “technischen Daten” machen in aller Regel keinen Sinn. Oftmals erfolgt eine pauschalisierte Angabe der Art “5-Megapixel Objektiv”. Eine entsprechende Angabe ohne detaillierte Nennung der Einsatzbedingungen und der Art der Definition ist lediglich als Werbeaussage zu verstehen. Die gleiche Optik kann — je nach Definition — der MPixel gut und gern zwischen 2 und 30 MPixel variieren. Eine einfache Möglichkeit ist es, z.B. statt Werte basierend auf einem Kontrast von 30% Werte für 10% anzugeben. Selbst wenn MTF-Kurven zur Verfügung gestellt werden ist zu hinterfragen, ob es sich um rein designbasierte Kurven oder aber um echte Messungen handelt. Bei designbasierten Kurven wird teilweise die Beugung nicht berücksichtigt (“geometrische MTF”) so dass insbesondere bei höheren Blendenzahlen das Datenmaterial mehr oder weniger nutzlos wird.

In aller Regel geben die Objektivhersteller leider überhaupt keine sinnvollen Kennwerte an und — wenn überhaupt — kann man nur per Rückfrage an die Optik MTF Kurven gelangen. Diese Kurven variieren massiv mit den Einsatzbedingungen für das Objektiv. Es ist also darauf zu achten, dass Blendenzahl, Arbeitsabstand, Schärfentiefe, Wellenlängen von MTF und geplantem Einsatz möglichst exakt übereinstimmen. Ansonsten kann leicht eine erhebliche (Faktor 2...10) Variation der Spezifikation auftreten. So ist es denkbar, dass der Bildsensor sich unnötig verteuert und die Bildwiederholfrequenz drastisch und unnötig eingeschränkt wird (Transfer von unnötig vielen Pixeln). Teilweise, z.B. bei der Schärfentiefe, sind sehr unterschiedliche Definitionen gebräuchlich, so dass hier genau überdacht werden muss, ob Werte wirklich vergleichbar sind.

Bei allen Überlegungen zum Kontrast von Strukturen ist zu beachten, dass der sich letztlich im digitalen Bild ergebende Kontrast eine multiplikative Kombination des Kontrast aufgrund des idealen Bildes der Optik-MTF und der Sensor-MTF ist.

Die in Abbildung 5.6.14 exemplarisch angegebenen Kurven zeigen, dass für übliche Bildsensorformate teilweise eine hohe Auflösung im Bereich der industriellen Bildverarbeitung durchaus Sinn machen kann.

Die Kurven sind dahingehend geschönt, dass der mittlere Kontrast bei der Auswertung verwendet wurde. Letztlich hängt der Kontrast bei hohen Ortsfrequenzen stark von der Orientierung des abzubildenden Gitters ab. Es kann so durchaus sein, dass der Kontrast verschiedener Gitterorientierungen um den Faktor zwei variiert bzw. dass bei ungünstiger Gitterorientierung der Kontrast deutlich unter die an sich veranschlagte 30% Marke fällt. Weiterhin muss bedacht werden, dass die Ergebnisse für eine perfekte Fokussierung erzielt wurden. Die MTF ändert sich auch mit leichtem Defokus sehr drastisch im Bereich hoher Ortsfrequenzen (s. z.B. Abb. 5.6.13). Da in den meisten Aufgabenstellungen ausgedehnte (tiefe) Objekte abgebildet werden und darüber hinaus oftmals auch Lagetoleranzen durch die Zuführung der Objekte gegeben sind ist unter Umständen die Defokus induzierte Reduktion der Auflösung entscheidend.

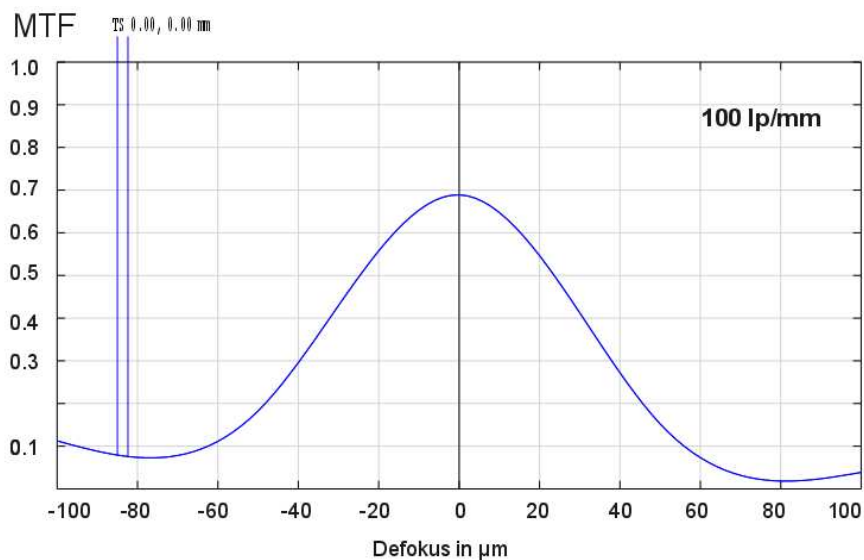


Abbildung 5.6.13: Variation der MTF mit Defokus. Ein Beispiel.

5.7 Weitere Auflösungskennzahlen

In der Bildverarbeitung werden in aller Regel Auflösungen gemäß Rayleigh (s.o.) oder aber mittels der Modulationstransferfunktion (siehe Kapitel 4) definiert. Den-

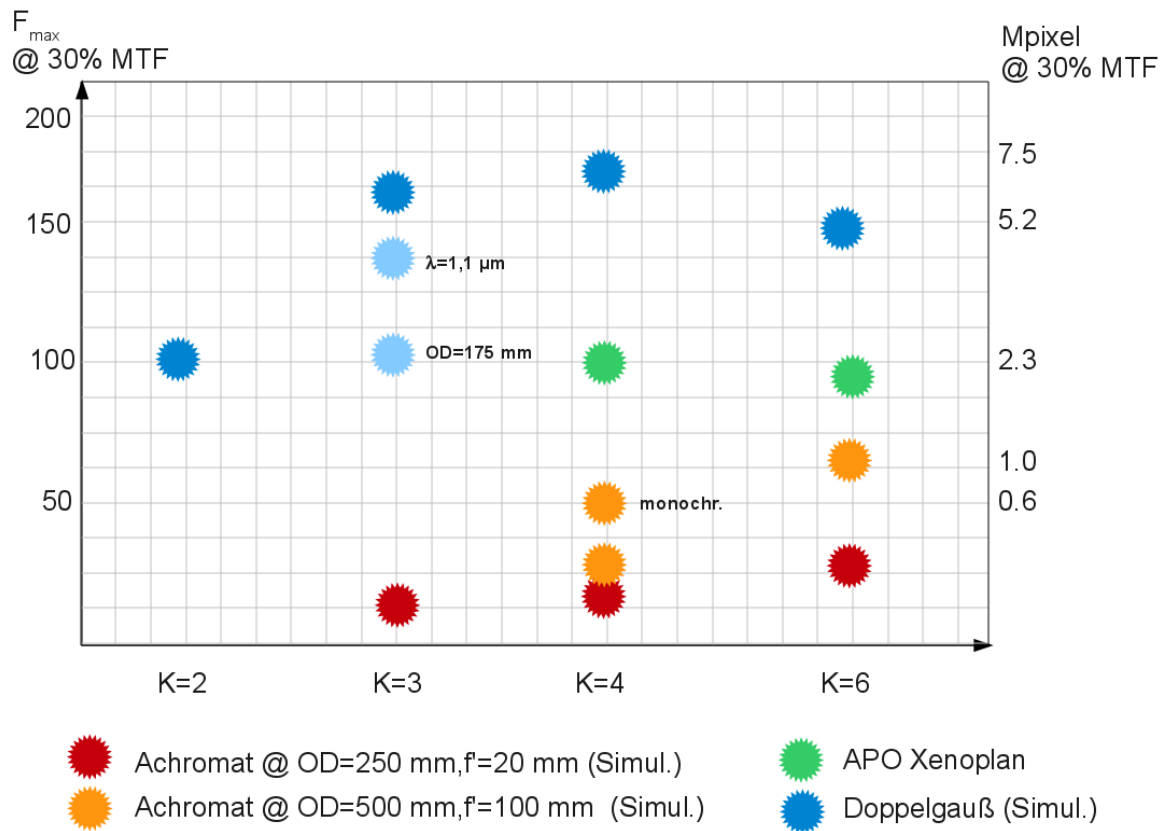


Abbildung 5.6.14: Erzielbare Grenzauflösungen (bei 30% minimal gefordertem Kontrast) verschiedener exemplarischer Objektive für ein Bildfeld von 8.8 mm x 6.6 mm (2/3 Zoll Sensor). Die Umrechnung in MPixels ist stark definitionsabhängig (siehe Text). Verwendet wurde zur Berechnung die feldabhängige sagittal(radial) und tangential gemittelte MTF. Das Doppelgaußobjektiv kann als typisches hochwertiges Bildverarbeitungsobjektiv angenommen werden. Die dargestellten Werte beinhalten aber keine Fertigungsfehler bzw. Toleranzen. Für ein qualitativ sehr hochwertiges Objektiv wurde das Schneider Kreuznach APO Xenoplan 1.8/35 mit eingetragen. Da die MTF Kurven nicht für Grenzfrequenzen oberhalb 75 lp/mm vorliegen sind die eingetragen Grenzfrequenzen lediglich Schätzungen (basierend auf den vorhandenen Frequenzen).

noch werden teilweise auch andere Angaben verwendet. Die wichtigsten sind:

Auflösung nach Abbe: Die Auflösung nach Abbe ist formal bis auf einen Vorfaktor mit der Auflösung nach Rayleigh (Gl. 5.1) identisch (1 statt 1.22). Letztlich wird sie aus der Abbildung eines periodischen Gitters abgeleitet (siehe z.B. [6]) und macht hier auch als Angabe Sinn. Sie wird besonders häufig in der Mikroskopie eingesetzt.

Sparrow Kriterium: Eine weitere Abwandlung des Rayleigh Kriteriums stellt das Sparrow Kriterium dar. Dabei ergibt sich gerade ein Minimum für die Einhüllende bei der Abbildung von zwei eng benachbarten Punkten auszubilden. Da dieses Minimum aber zunächst infinitesimal klein ist, ist das Kriterium in der Praxis meist wenig hilfreich. Gegenüber der Auflösung nach

Rayleigh ergibt sich ein Vorfaktor von 0.93 anstatt 1.22.

Strehl Kriterium: Die Strehlzahl bzw. Strehlverhältnis ist das Verhältnis aus Intensität im Spotmaximum bei der Abbildung eines einzelnen Punktes im Vergleich zur Intensität an der selben Position für ein System ohne Aberration. Somit ist die Strehlzahl vor allem geeignet, um die Korrektur bzw. Qualität einer optischen Abbildung zu beurteilen (z.B. Strehlzahl > 80%). Für die Auslegung einer konkreten BV-Anwendung ist der Parameter sehr ungünstig bzw. muss erst näherungsweise in eine Spotradius umgerechnet werden.

Three-Bar Resolution: Sehr gebräuchlich ist die Beurteilung der Bildqualität an sogenannten Three-bar resolution targets, die aus unterschiedlich skalierten Gruppen von jeweils drei Balken bestehen. Am gebräuchlichsten sind die US-AF 1951 targets.

Siemens-Stern: Das kreisförmige Testmuster besteht aus 16 oder 32 Schwarz-Weiß-Speichen. Im Zentrum des Kreises wird die lokale Streifendichte sehr hoch, so dass man zur Auflösungsbeurteilung den Radius verwenden kann, bei dem die Speichen gerade noch aufgelöst werden. Aufgrund der radialen Symmetrie lässt sich sehr gut beurteilen, wie die Auflösung mit der Orientierung variiert.

Eine Umrechnung verschiedener Qualitätskennzahlen ineinander ist meistens nicht bzw. eben nur im Sinne einer Näherung möglich. Sehr oft ist man an einem Vergleich von MTF Kennzahlen mit 2-Punkt Auflösungen interessiert. Für ein System nahe der Beugungsbegrenzung kann man näherungsweise annehmen

$$f_{max} \approx \frac{1.22}{r_{spot}} \approx \frac{1}{\lambda K} \quad (5.10)$$

Beispiel: Wir benötigen für eine Anwendung einen RMS-Durchmesser der Bildpunkte (bei der Abbildung idealer Objektpunkt) von $11 \mu\text{m}$. Zur Verfügung steht ein Objektiv das laut Spezifikation einen Kontrast von 30% bei 60 lp/mm liefert. Kann dieses Objektiv eingesetzt werden?

Lösung: $f_{max} = 1.22/11 \text{ microns} = 110.000 \text{ lp/m} = 110 \text{ lp/mm}$. In einfachster Näherung (mehr Information ist uns nicht bekannt) wird für die MTF ein lineares Verhalten gemäß

$$MTF(f) = 1 - f \quad (5.11)$$

mit der normalisierten Frequenz $f = f_u/f_{max}$. Daher ergibt sich hier $MTF(f) = 0.3 \approx 1 - f$ und für den Kontrast von 30% also $f=0.7$ bzw. $f_{max} = 60/0.7 = 85 \text{ lp/mm}$.

Andererseits fordern wir aber gemäß der Aufgabe $f_{max} = 1.22/11 = 110 \text{ lp/mm}$. Daher wird das Objektiv die Anforderung nicht erfüllen können.

Für die Charakterisierung der Auflösung wird man in der Praxis meist die letztlich zu betrachten Merkmale mit dem kompletten Abbildungssystem abbilden und so entscheiden, ob die Abbildungsqualität insgesamt ausreichend ist.

Für einen quantitativen Vergleich der Abbildungsleistung aber auch für eine Beurteilung bei nicht-vorhandenen Objektdetails (z.B. Kratzer der richtigen Größe) kann es aber Sinn machen, standardisierte Testobjekte zu verwenden. Meist werden binäre Teststrukturen eingesetzt, denn zum einen ist die Herstellung vergleichsweise einfach und zum anderen ist der Kontrast des Objekts damit klar definiert (nahezu 1). Gebräuchlich und kommerziell einfach verfügbar sind:

- USAF 1351 Three-Bar Teststrukturen¹³
- Gitter mit verschiedenen Frequenzen ($\rightarrow$ MTF)
- Siemenssterne
- IEEE Resolution Target
- NBS 1963A Resolution Target
- standardisierte Bilder von Szenen (z.B. IEEE)

¹³Das USAF 1951 Testmuster liefert rein aufgrund der Dreierstrukturen eine etwas andere Auflösung als ein regelmäßiges ausgedehntes Gitter.

- Kieselalgen (Diatomeen)

Wenn das feldabhängige Verhalten geprüft werden soll muss entweder das Testobjekt verschoben werden oder aber das Testobjekt wird direkt repliziert über das gesamte Feld verwendet.

Generell gilt natürlich, dass man Teststrukturen zur Prüfung verwenden sollte, die einerseits eine quantitative Beurteilung ermöglichen, andererseits aber möglichst ähnlich zur geplanten Anwendung sind.

5.8 Positionsauflösung

Oftmals interessiert in der industriellen Bildverarbeitung nicht die Auflösung im Sinne einer Abbildung feinsten Details sondern primäres Ziel ist die Messung geometrischer Größen, z.B. Durchmesser einer Bohrung oder Abstand von Kanten zueinander.

Dies wird bewerkstelligt, indem die Position verschiedener Merkmale mit möglichst geringer Messunsicherheit bestimmt wird. Die Messunsicherheit wird dabei zum einen durch die Kalibrierung und die Rückführbarkeit auf eine Referenzmessung oder ein kalibriertes Objekt bestimmt, zum anderen hängt sie aber auch von rein statistischen Fehlern ab. Diese Zusammenhänge können insgesamt sehr komplex werden. So kann z.B. in einer konkreten Anwendung die Messunsicherheit immer im Januar erhöht sein weil die Temperatur der Anlage dann leicht anders ist (thermische Ausdehnung), oder aber der Fremdlichtanteil führt mittags im Januar zu einer erhöhten Messunsicherheit.

Die Fehlerquellen für entsprechende, systematische Fehler sind vielfältig und wir werden im Kapitel 11 noch auf diese Problematik näher eingehen. Gehen wir aber davon aus, dass entsprechende systematische Fehler vermieden bzw. durch Kalibrierung eliminiert worden sind. Dennoch wird die Bestimmung der Position eines Merkmals (z.B. einer Kante) natürlich nicht beliebig genau möglich sein sondern durch das Bildaufnahmesystems begrenzt sein.

Es ist wichtig sich klar zu machen, dass die Messunsicherheit aufgrund der optischen Abbildung und der Bildaufnahme aber nicht gleich der Auflösung im Sinne der Trennung feiner Details ist. Wir können also nicht einfach die Auflösung nach

Rayleigh oder die Pixelgröße verwenden, um die Positionsauflösung zu schätzen.

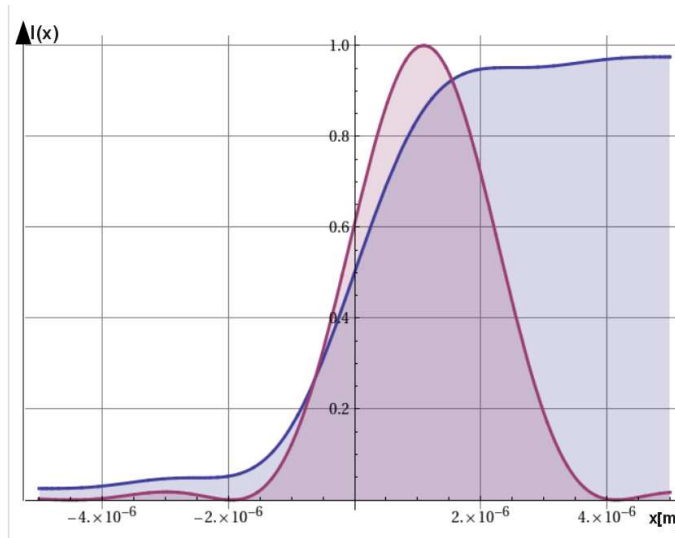


Abbildung 5.8.15: Die Positionsauflösung, die sich bei Antastung einer Kante ergibt kann wesentlich höher als die optische Auflösung im Sinne einer Zweipunktetrennung sein.

Vielmehr ergibt sich auf dem Bildsensor im Bereich der abgebildeten Kante ein Helligkeitsverlauf und basierend auf diesem Helligkeitsverlauf wird die Kantenposition geschätzt. Hierzu stehen verschiedene mehr oder weniger aufwändige Verfahren zur Verfügung, in der Praxis erreicht man unter günstigen Bedingungen aber durchaus Positionsaufösungen von ca. $1/10 \dots 1/50$ Pixel.

Sie müssen weiter beachten, dass oftmals verschiedene Positionsbestimmungen gemittelt ein Endergebnis ergeben. Wenn beispielsweise der Abstand zweier paralleler Kanten ermittelt werden soll dann kann entlang der Kante gemittelt werden und bei N Mittlungen kann der statistische Fehler um $\sqrt{N}$ reduziert werden. Somit lassen sich dann letztlich geometrische Parameter mit einer sehr viel höheren Genauigkeit ermitteln als man zunächst gemäß der Auflösung erwarten würde.

Beachten Sie aber auch, dass eine Positionsauflösung nicht mit einer Messunsicherheit gleichzusetzen ist. Sie benötigen eine deutlich höhere Auflösung als die Messunsicherheit, die sie erzielen wollen (Faustregel: Faktor 10). Als (sehr grobe) Abschätzung für die Messunsicherheit der Position, die sie letztlich bei einer gegebenen optischen Auflösung r_a (im Sinne der Punktetrennung) und einer gegebenen Anzahl von Mittlungen N erzielen, können Sie also bei optimalen Bedingungen (hohe Abtastrate der Beugungsbegrenzung, geringe Aberrationen)

von

$$\Delta X = \frac{r_a}{\sqrt{N}} \quad (5.12)$$

ausgehen. Dabei wurde angenommen, dass die Position mit 1/10 der Auflösung nach Rayleigh bestimmt werden kann. Allerdings ist der in der Praxis erzielbare Wert stark von der konkreten Algorithmik und der Anwendung abhängig, so dass es sich lohnt, bei entsprechenden Aufgabenstellungen ausführlicher die Problematik zu beleuchten.

Für eine Charakterisierung können typische Kalibriertargets eingesetzt werden. Diese sind für kleine Objektfelder kommerziell in vielfältiger Form, z.B. als schachbrettartige Strukturen, Punktarrrays oder konzentrische Kreise kommerziell verfügbar.

5.9 Kohärente Abbildungen

Kohärente Abbildungen werden in der industriellen Bildverarbeitung vergleichsweise selten eingesetzt¹⁴. Insbesondere ergeben sich durch die Kohärenz Probleme an Kanten (Überschwingen) und Rauschen aufgrund von “Granulation” (Speckles) (siehe Abb. 5.9.16). Die mathematische Beschreibung des Systems erfolgt durch eine kohärente Übertragungsfunktion. Die inkohärente und kohärente Übertragungsfunktion sind über die Autokorrelation miteinander verbunden.¹⁵

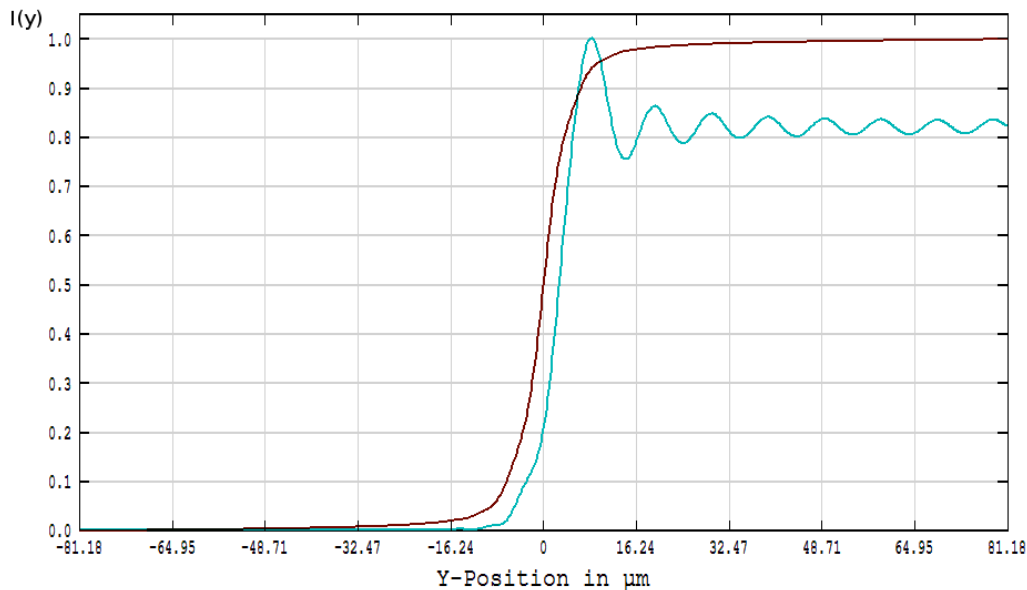


Abbildung 5.9.16: Überschwinger an Kanten bei kohärenter Abbildung eines Objekts (im Vergleich zur inkohärenten Abbildung).

Ob eine kohärente, eine inkohärente oder aber eine teilkohärente Abbildung vorliegt muss basierend auf Parametern zur Beschreibung der *zeitlichen* und *räumlichen* Kohärenz erfolgen. Nur wenn *sowohl* die zeitliche wie auch die räumliche Kohärenz gegeben ist muss mit Problemen aufgrund von Speckles oder anderen kohärenten Störungen gerechnet werden.

Abb. 5.9.17 verdeutlicht das Zustandekommen der Granulation (Speckles). Eine raue Oberfläche wird mit kohärentem Licht beleuchtet. Hierdurch gehen von der Oberfläche Kugelwellen mit unterschiedlicher Phase aus, denn die Position der

¹⁴Eine Ausnahme stellen strukturierte Beleuchtungen dar, die oft mittels diffraktive optischen Elementen und kohärenter Beleuchtung realisiert werden.

¹⁵Im kohärenten Fall gilt die Linearität für das elektrische Feld während im inkohärenten Fall die Linearität für die Intensität, also das elektrische Feld im Quadrat gilt. Daher ist das inkohärente Punktbild das Quadrat des kohärenten Punktbilds und aufgrund des Faltungssatzes.

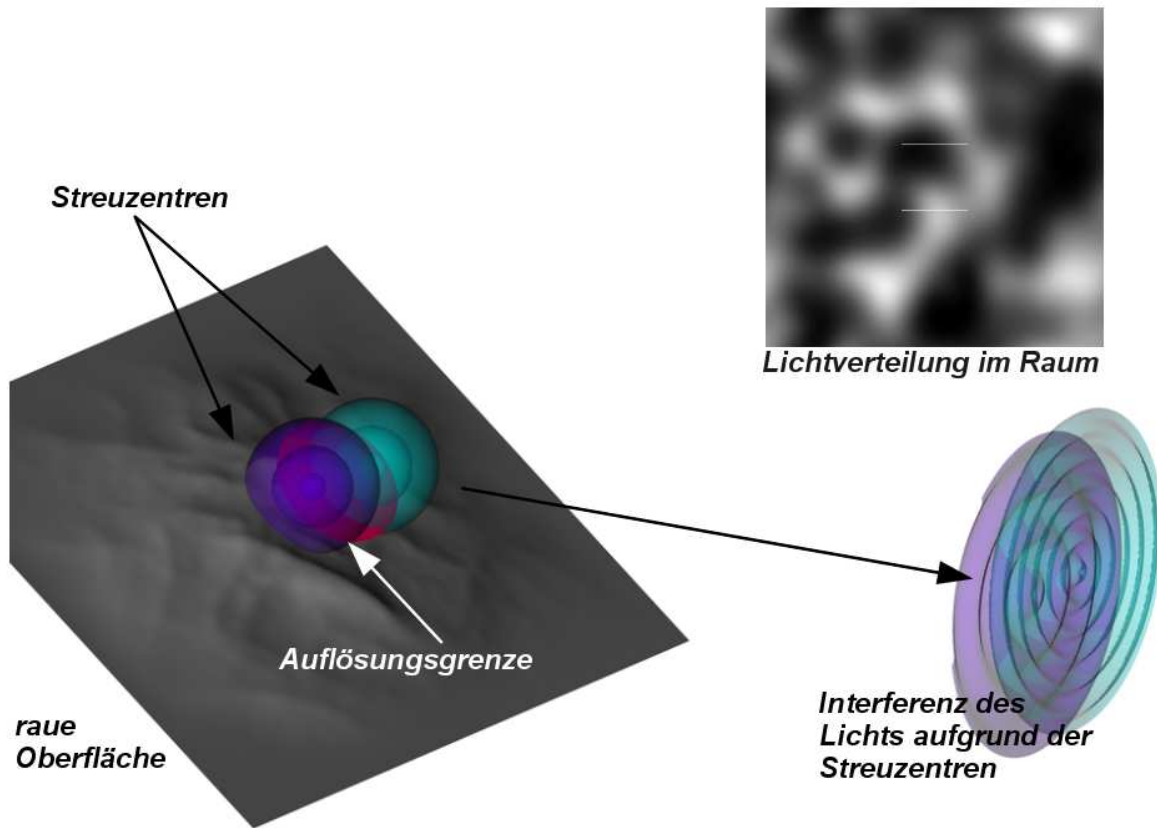


Abbildung 5.9.17: Prinzip der Speckleentstehung: Die von eng benachbarten Punkte auf der rauen Oberfläche ausgehenden Wellen überlagern sich in der Bildebene aufgrund der begrenzten Auflösung (Bildfehler und Beugungsbegrenzung). Die zufälligen Phasen dieser Wellen (raue Oberfläche) führen bei der Interferenz zu zufälligen Helligkeitmustern. Voraussetzung ist allerdings ausreichende zeitliche und räumliche Kohärenz.

Kugelwellen ist aufgrund der Rauigkeit zufällig. Bei der kohärenten Überlagerung (s.u.) werden nun die elektrischen Felder aufgrund aller Kugelwellen in der Sensorebene addiert und das sich so ergebende Gesamtfeld wird quadriert, um die Intensität zu erhalten (Abb. 5.9.18). Dabei ergeben sich Stellen “destruktiver Interferenz” bei denen die Intensität Null wird. Die mittlere Größe der Speckles ist gerade durch die Auflösung des Abbildungssystems nach Airy gegeben.

In der Regel sind diese Speckles für bildverarbeitende Anwendungen störend. Damit es aber überhaupt zur Ausbildung der Speckles kommt ist entscheidend, dass die Überlagerung wie beschrieben, eben “kohärent” stattfindet.¹⁶

Zentral ist zunächst die zeitliche Kohärenz. Sie wird spezifiziert durch die sogenannte “Kohärenzlänge” L die sich letztlich aus der spektralen Bandbreite $\Delta\lambda$ des

¹⁶Das Konzept der Kohärenz ist alles andere als trivial und wir werden hier nicht versuchen, die Kohärenz wirklich korrekt zu beschreiben.

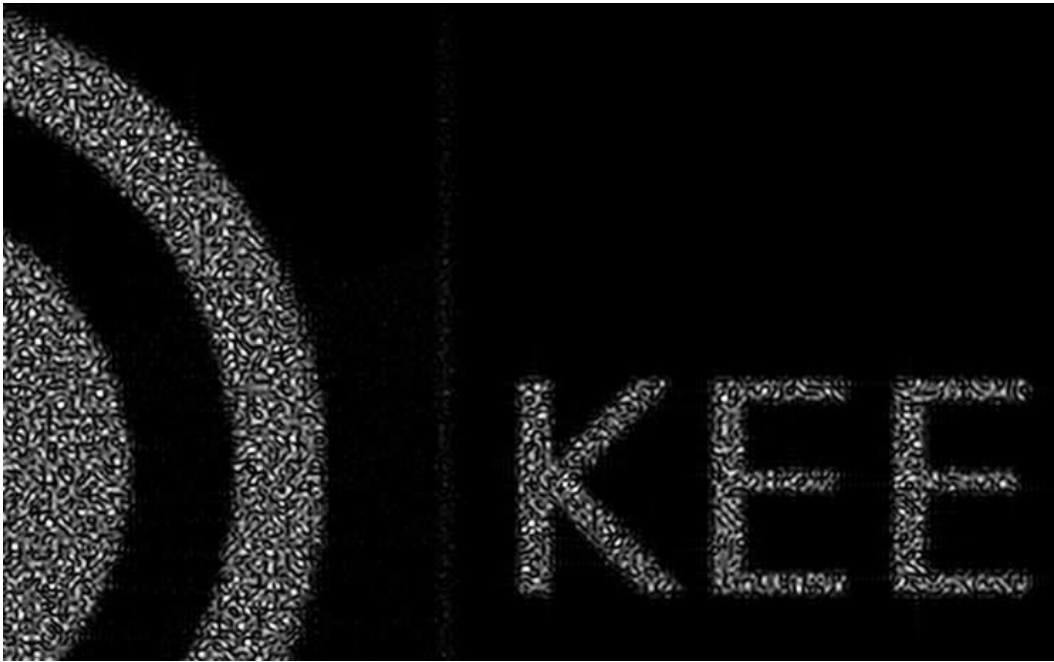


Abbildung 5.9.18: Ausschnitt eines (simulierten) Bildes bei vollständig kohärentem Licht und einer Abbildung mit geringer Blende. Geringe Intensitäten kommen dabei deutlich weniger häufig als hohe Intensitäten vor. Die mittlere Größe eines Speckles entspricht gerade der Auflösung nach Rayleigh.

genutzten Lichts nach

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (5.13)$$

berechnet. Anschaulich gibt die Kohärenzlänge direkt die Länge der Wellenpakete an, die die Lichtquelle aussendet (siehe Abb. 5.9.19). Eine starke Einschränkung der Wellenlänge, z.B. zur starken Fremdlichtreduktion, mit einem sehr engen Bandpassfilter kann so unter Umständen zu hoher zeitlicher Kohärenz und damit Speckles führen.

Damit Speckles auftreten können muss die Rauheit der Oberfläche deutlich kleiner als die Kohärenzlänge sein (z.B. um den Faktor 5..10 kleiner). Andererseits verschwinden die Speckles ebenfalls wenn die Rauheit sehr klein ($< \lambda/20$) ist.

Beispiel: : Sie benutzen eine Laserdiode bei $\lambda = 600 \text{ nm}$ mit einer spektralen Halbwertsbreite des Spektrum von $\delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$. Das beleuchtete Objekt hat eine Rauheit von 50 nm RMS . Schätzen Sie ab, ob mit Speckles zu rechnen ist oder nicht.



Abbildung 5.9.19: Die Kohärenzlänge entspricht der Wellenpaketlänge, die von der Lichtquelle ausgesendet wird. Die einzelnen Wellenpakete sind inkohärent zueinander, daher lassen sich Interferenzeffekte nur beobachten, wenn die Differenzen der optischen Weglängen kleiner als die Kohärenzlänge sind.

Lösung: Die Kohärenzlänge beträgt $L = 600^2/1 = 360.000 \text{ nm} = 0.36 \text{ mm}$ und liegt daher deutlich oberhalb der Oberflächenrauheit. Die Oberflächenrauheit ist also “klein genug”. Diese Voraussetzung für die Ausbildung von Speckles ist daher gegeben. Wir müssen aber zusätzlich untersuchen, ob die Rauheit stark genug ist um überhaupt ausreichend zufällige Phasen zu generieren. Dies ist der Fall denn $50 \text{ nm} > \lambda/20 = 30 \text{ nm}$.

Der zweite entscheidende Parameter, die räumliche Kohärenz, ist letztlich für in der Bildverarbeitung anfallende Aufgabenstellungen durch die (effektive) räumliche Ausdehnung der Beleuchtungsquelle gegeben. Für Laser ist die räumliche Kohärenz immer gegeben. Man kann sich das den Laser verlassende Licht in geometrischer Näherung am einfachsten durch das in Abb. 5.9.20 dargestellte Modell vorstellen, d.h. das Licht kommt scheinbar aus einem Punkt. Für andere Quellen, z.B. LEDs, ergibt sich räumliche Kohärenz wenn die Winkel- ausdehnung, mit der das Objekt beleuchtet wird klein gegen die laterale Ausdehnung des kohärenten Bereichs auf dem Objekt ist. Für eine kreisförmige Quelle mit dem Durchmesser D ergibt sich ein Durchmesser des in sich kohärenten Bereichs von etwa $\lambda \cdot z/D$.

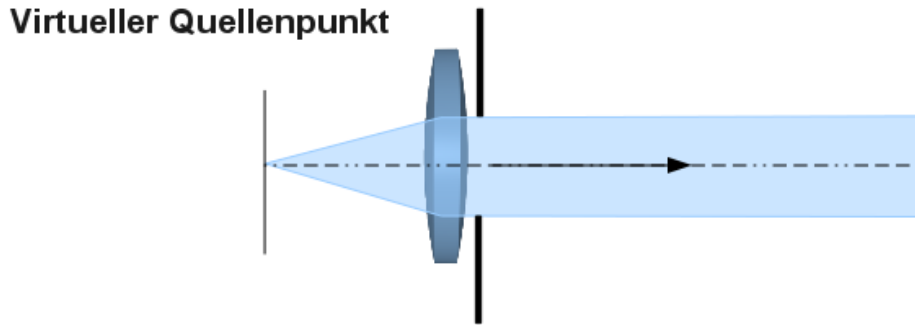


Abbildung 5.9.20: Das Lichtfeld eines Laser ist räumlich und zeitlich kohärent. Man kann es sich aus einem Punkt (räumliche kohärent) kommend und einfarbig (zeitlich kohärent) denken.

In aller Regel sind Speckles bei der industriellen Bildverarbeitung unerwünscht (Ausnahme: Messverfahren, die auf Speckles basieren, vgl. Abschnitt ?? und ??). Daher werden selten Laser zur Beleuchtung eingesetzt. Andererseits haben Laser den Vorteil, dass die gesamte Energie eben bei nahezu einer Wellenlänge abgestrahlt wird und daher eine Fremdlichtunterdrückung sehr effektiv durchgeführt werden kann.

Wenn Speckles also bei einer Laserbeleuchtung vermieden werden sollen muss eine wie auch immer geartete Mittelung verwendet werden. Im einfachsten Fall erfolgt eine räumlich Mittelung auf den einzelnen Pixeln des Bildsensors. Entscheidend hierbei ist dann natürlich der mittlere Durchmesser eines Speckles. Dieser lässt sich nach

$$r_{aver} \approx 0.61 \frac{\lambda}{NA'} \quad (5.14)$$

berechnen, entspricht also letztlich der nach Airy gegebenen Zweipunkt Auflösung.

Beispiel: Für eine Anwendung mit kohärenter Beleuchtung sollen im Durchschnitt ca. 25 Speckles auf einen einzelnen Pixel fallen um eine ausreichende Reduktion des specklebedingten Rauschens zu erreichen. Die Pixelgröße beträgt $8 \mu\text{m}$. Welche Blendenzahl können wir verwenden?

Lösung: 25 Speckles bedeuten, dass 5×5 Speckles auf einen Pixel fallen. Dementsprechend sollte die mittlere Specklegröße $8 \mu\text{m} / 5 = 1,3 \mu\text{m}$ betragen.

Für den Radius des mittleren Speckles bedeutet das, dass dieser kleiner $0,65 \mu\text{m}$ sein sollte. Und damit ergibt sich

$$0.65 = 0.61\lambda/NA, \quad (5.15)$$

also $NA \approx 1$. Daher würde die Blendenzahl 0.5 betragen, ein leider nicht sonderlich realistischer Wert (theoretisches Maximum). Die geplante Mittelung kann so also nicht durchgeführt werden.

Neben der räumlichen Mittelung kann auch eine zeitliche Mittelung die Speckles effektiv reduzieren. Hierzu werden z.B. rotierende Diffusoren im Beleuchtungsstrahlengang eingesetzt. Damit wird erreicht, dass sich die Phasen auf dem Objekt zufällig im Zeitverlauf ändern und dementsprechend das sich ergebende Specklemuster zeitlich zufällig variiert und somit über die Belichtungszeit des Sensors mittelt. Neben mechanisch rotierenden Elementen können auch elektrisch bzw. elektronisch variierbare Elemente (z.B. Flüssigkristallmodulatoren) eingesetzt werden.

Bei geeigneten Bedingungen ergeben sich durchaus auch ohne die Verwendung (leichte) Speckles. Abb. 5.9.21 zeigt einen von Sonnenlicht beleuchteten Laminatboden. Die Rauheit ist ausreichend gering, um bei der kurzen Kohärenzlänge des Sonne (einige Mikrometer) dennoch Speckles auszubilden. Die räumliche Kohärenz (Ausdehnung der Sonne) ist ebenfalls hoch genug. Je größer die Lichtquellenausdehnung (Variation des Beleuchtungswinkels auf die abzubildenden Oberfläche), desto geringer sind Speckleeffekte.

5.10 Auflösungsreduktion bei Farbsensoren

Bei Farbsensoren ergeben sich teilweise sehr störende Farbartefakte, die letztlich natürlich ihre Ursache in der Dispersion des Objektivs haben. Unterschiedliche Wellenlängen werden in unterschiedliche Ebenen fokussiert (longitudinale chromatische Aberration). Wenn auf den grünen Spektralbereich perfekt fokussiert wird dann sind sowohl der Rot- als auch der Blaukanal leicht defokussiert. Eine feines Detail oder eine Kante erhält dementsprechend einen violetten Halo. Der Effekt ist natürlich umso stärker, je offener die Blende ist denn dadurch ergibt sich eine sehr geringe Schärfentiefe. Bei monochromatischen Sensoren ergeben

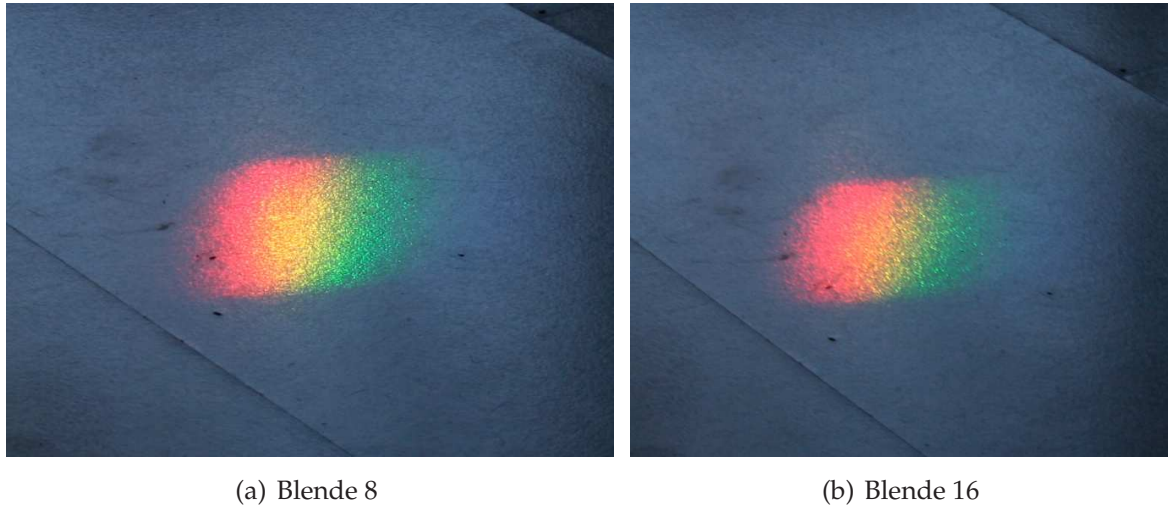


Abbildung 5.9.21: Specklemuster auf einem Laminatboden bei verschiedenen Blendenzahlen. Die mittlere Specklegröße variiert direkt proportional zur Blendenzahl. Beleuchtung mit Sonnenlicht

sich natürlich im digitalen Bild keine Farbsäume, der Effekt führt aber bei einer Beleuchtung mit weißem Licht eben zu einer reduzierten Auflösung.

Die monochromatischen MTFs der einzelnen Spektralanteile haben durchaus einen deutlich unterschiedlichen Verlauf. Wenn nun die MTF im roten Spektralkanal bei mittleren und hohen Frequenzen im Vergleich zu Blau und Grün ausgeprägt hoch ist, dann ergibt sich zwangsläufig im Kantenbereich (das Ortsfrequenzspektrum der Kante enthält viele hohe Frequenzen) eine Verstärkung der Rottöne. Bei monochromatischen Sensoren führt dies “nur” zu einer Verringerung der Auflösung. Bei Farbanwendungen können entsprechende Farbsäume aber darüber hinaus erhebliche Probleme bereiten.

Zur Vermeidung entsprechender Störungen muss sichergestellt werden, dass die Information räumlich gemittelt bzw. verschmiert wird. Bei sehr kleinen Pixeln, wie sie in vielen Consumerprodukten zu finden sind reicht hierfür in aller Regel bereits die durch die Optik (Aberrationen und Beugungsbegrenzung) gegebene Unschärfe. Ansonsten kann aber auch ein optisches Tiefpassfilter direkt vor dem eigentlichen Sensor verwendet werden. Abb. ?? zeigt einen doppelbrechenden Tiefpassfilter. Das auf einen Pixel einfallende Licht wird durch die doppelbrechende Strahlaufteilung auch auf 3 benachbarte Pixel gelenkt.

Die Auflösung leidet natürlich unter entsprechender Tiefpassfilterung, aber auch die Farbinterpolationsalgorithmik führt zu einer Verschlechterung der Auflösung. Farbsensoren sollten daher bei auflösungskritischen Aufgabenstellungen nur eingesetzt werden, wenn dies wirklich notwendig ist.

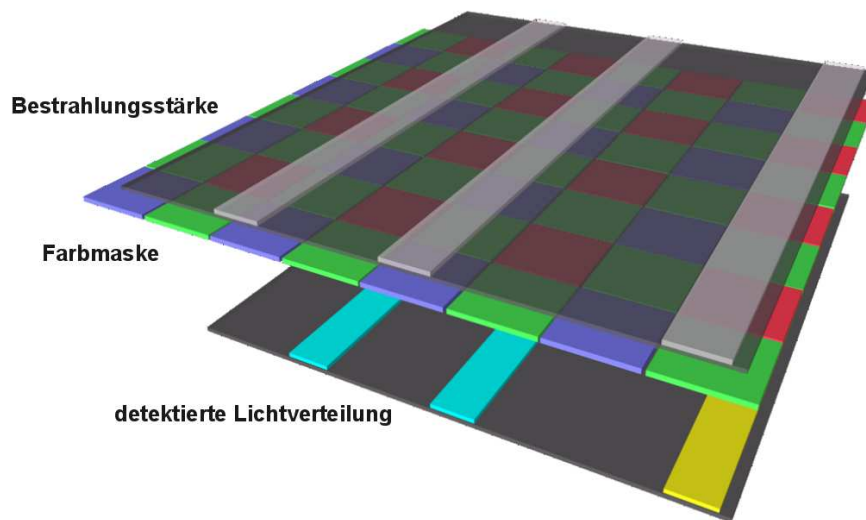


Abbildung 5.10.22: Die überwiegende Anzahl von Farbsensoren nutzt ein absorbierendes Farbfilter vor den lichtempfindlichen Pixeln. Aus den sich so ergebenden Daten werden die jeweils fehlenden beiden Farben an jedem Pixel durch Interpolation gewonnen. Sehr fein strukturierte Helligkeitsverteilungen können zu Farbbaliasing führen. Es ergeben sich stark störende Farbeffekte. Zur Vermeidung dieser Effekte werden Unschärfen und optische Tiefpässe eingesetzt.

Kapitel 6

Objektive

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Welche unterschiedlichen Objektivtypen am Markt verfügbar sind.
- Wie die Leistung der Objekte spezifiziert wird.
- Was bei der Auswahl zu beachten ist.
- Welche Filter zum Einsatz kommen können.
- Was hinsichtlich Pflege und Reinigung zu beachten ist.

Objektive gibt es in einer Vielzahl von Ausführungen, mit ganz unterschiedlichen Bauformen und zu unterschiedlichen Preisen. Die Auswahl des für eine Anwendung passenden Objektivs ist alles andere als einfach. Wesentlich ist, die Abbildungsaufgabe zunächst exakt zu definieren bzw. die verschiedenen möglichen Varianten zu betrachten.

Basierend auf möglichen Anwendungsgeometrien und Sensorgrößen berechnen Sie die gewünschte Brennweite und Blendenzahl. Damit kommen Sie dann zunächst zu den wesentlichen Grundparametern, die es bei einer Auswahl zu betrachten gilt:

- Brennweite
- Blendenzahl

- Arbeitsabstand
- Sensorgröße
- Wellenlängenbereich / Farbe.
- Perspektive (Telezentrisch oder Nicht-telezentrisch)

Aus den Überlegungen in Kapitel 2 wird das Objektiv zunächst durch Brennweite und Blendenzahl definiert. Aber das reale Objektiv muss hinsichtlich seiner Abbildungsleistung optimiert werden und diese Optimierung orientiert sich an einem speziellen Arbeitsabstand und für ein vorgegebenes Bildfeld. Sie können daher z.B. nicht erwarten mit einem 50/1.8 Objektiv, das für einen 1/3 Zoll Sensor berechnet wurde, gute Ergebnisse für einen 2/3 Zoll Sensor zu erhalten.

Grundsätzlich stehen uns verschiedene Varianten zur Realisierung einer Abbildungsoptik zur Verfügung:

Standard-BV Objektiv: Diese Variante ist sicher in den meisten Anwendungen das Mittel der Wahl. Die Objektive sind etwas teurer als konventionelle Fotoobjektive, aber hinsichtlich ihrer Eigenschaften auf BV Anwendungen ausgelegt. Insbesondere sind typische BV-Anschlußgewinde (vgl. Abschnitt ??) vorgegeben und in der Regel lassen sich Einstellungen wie Fokus, Blende oder Zoom feststellen, so dass eine ungewollte Verstellung während des Betriebs (z.B. durch Vibrationen) nicht erfolgt.

Fotoobjektive: Zeichnen sich durch ein sehr gutes Preis-Leistungsverhältnis aus, d.h. eine gute bis sehr gute Abbildungsleistung wird preisgünstig erreicht. In der Regel sind die Objektive allerdings für eher große (oft unendlich) Arbeitsabstände optimiert. Anschluss, manuelle Einstellung und Feststellung können problematisch sein.

Kombination zweier Fotoobjektive: Die Kombination zweier auf unendlich korrigierter (Foto-)Objektive im Sinnes eines Keplerteleskops erzielt eine große numerische Apertur und die Möglichkeit der telezentrischen Perspektive bei guter Abbildungsqualität. Nachteilhaft ist die recht große Baulänge der Kombination (vgl. Abschnitt 2.2).

Einzellinsen: Achromate (=Doublets) sind vergleichsweise günstig erhältlich und lassen sich bei begrenztem Feld und begrenzter Apertur auch sinnvoll für einfache Abbildungsaufgaben einsetzen. Eine Kombination zweier Achromate

ist ganz analog zur Kombination der Fotoobjektive möglich und wird auch bereits gefasst als “Achromatic Pair” kommerziell angeboten. Gegenüber einzelnen Achromaten werden bei geringen Kosten auch sogenannte Triplets (3 zusammengeklebte Elemente) und Elemente mit einer asphärischen Fläche eingesetzt.

Relay-Linsen: Für 1:1 Abbildungen wird üblicherweise ein voll symmetrischer Aufbau der Optik angestrebt. Dadurch werden insbesondere Verzeichnungen automatisch eliminiert. Entsprechende Relay-Linsen werden kommerziell angeboten. Die einfachste sinnvoll nutzbare Variante ist das Steinheil Triplet.

Mikroskopische Abbildungen: Mikroskopische Abbildungen, die zu einer vergrößernden¹ führen werden durch die Kombination eines speziellen Mikroskopobjektivs und einer Tubuslinse (meist genügt ein Achromat) realisiert.

Spezialanfertigungen: Spezialanfertigungen sind in der Regel dann notwendig, wenn eine unübliche Abbildungsgeometrie vorliegt oder durch ein Medium abgebildet werden muss. Auch ungewöhnliche Wellenlängenbereich (z.B. UV) machen oft ein Spezialdesign notwendig.

In aller Regel werden die meisten Anwendungen also mit Standard-BV Objektiven oder Standard-Mikroskopobjektiven realisiert und wir werden uns vorrangig die Spezifikation dieser Objektive anschauen. Bevor detaillierter auf die einzelnen Objektivtypen eingehen werden wir zunächst die wesentlichen Parameter der Spezifikation besprechen.

Für die Wahl des Objektivs ist es wesentlich, dass für alle diese Parameter klar ist, welchen Wertebereich das Objektiv dabei jeweils abdecken muss.

6.1 Weitere Beurteilungskriterien

Neben den im letzten Abschnitt bereits dargestellten Grundparametern sind eine Reihe weiterer Parameter essentiell bei der Objektivwahl.

¹oder auch Abbildungsmaßstab nahe ± 1

Auflösung: Natürlich ist Auflösung im Sinne der gerade noch auflösbaren feinsten Strukturen ein für sehr viele Aufgaben immens wichtiger Parameter. Die Spezifikation sollte hierbei an die konkrete Aufgabenstellung angepasst sein. Beachten Sie weiterhin, dass — wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt — die sich letztlich ergebende Gesamtauflösung nur teilweise von der Optik abhängt. Bedenken Sie auch die Schärfentiefe und die Kontrastverminderung durch den konkret geplanten Bildaufnehmer. Eng verbunden mit der Auflösung (je nach Spezifikation der Auflösung) ist natürlich der Kontrast der Abbildung. Nicht nur Aberrationen und die Beugungsbegrenzung sondern auch Streulicht kann zu einer Kontrastverminderung führen. So dass auch bei der Spezifikation der Auflösung über Bildpunktradien dennoch die MTF beachtet werden sollte.

Letztlich interessiert auch der erzielbare Kontrast bei weniger feinen Strukturen. Bei der visuellen Betrachtung des Bildes ist er oftmals der maßgebliche Parameter zur subjektiven Beurteilung. Für einen hohen Kontrast ist wichtig, dass die MTF insgesamt einen möglichst hohen Wert hat. Das System sollte vor allem bei niedrigen und mittleren Frequenzen gute Werte erzielen.

In den meisten Fällen wird die Auflösung bei BV-Objektiven mittels der MTF spezifiziert. Beachten Sie aber unbedingt, dass die MTF Kurven oder Grenzfrequenzen bei den von Ihnen spezifizierten Bedingungen gelten bzw. bei verschiedenen Objektiven auch dahingehend vergleichbar sind. MTF-Kurven für unterschiedliche Blendenzahlen, Feldwinkel oder Wellenlängen sind schlicht nicht miteinander vergleichbar. Sie müssen ebenfalls darauf achten, ob die dargestellten MTF-Kurven wirklich Messkurven sind. Einige Hersteller sparen sich die MTF Messung (oder sind mit den Ergebnissen nicht zufrieden) und geben stattdessen die theoretischen, aus dem Design stammenden MTF-Kurven an. Es ist klar, dass dies kaum eine Aussagekraft hinsichtlich des wirklichen Verhaltens des realen Objektivs hat. Und selbst wenn es sich um an sich vergleichbare Messkurven handelt bestehen oftmals erhebliche Unterschiede wenn unterschiedliche Messmethodiken angewendet werden. Im Zweifelsfall sollten Objektive geliehen werden und dann die Auflösung mittels eines einfachen Binärgitters (besser: Binärgitter mit zunehmender Periode) geprüft werden.

Bei vielen Produkten ist nur ein einzelner Wert (z.B. "Auflösung") ohne Angabe der Einsatzbedingungen angegeben. Diese Angabe ist in aller Regel nicht nutzbar. Teilweise finden sich auch lediglich Angaben der Art "geeignet für 5 MPixel". Auch dies eine Angabe, die schlicht nichts aussagt. Seriöse Hersteller hochquali-

tativer Optiken (z.B. Schneider-Kreuznach) stellen die notwendigen Angaben zur Verfügung und können zumindest auf Nachfrage die relevanten Daten liefern.

Lichtstärke (Transmission und Vignettierung): Die Lichtstärke ist zunächst direkt proportional zu $1/K^2$. Aber auch die Transmission des Objektivs und seine Vignettierung können entscheidend sein. Bei Mikroskopobjektiven kann hier durchaus die Hälfte des Lichts durch Reflexionen an den Teillinsen verloren gehen. Die Vignettierung kann zwar durch Beleuchtung oder Software ausgeglichen werden, aber dies geht immer mit einem erhöhten Aufwand und einer Verringerung des Signal-Rausch Verhältnisses einher. Es sollte also überdacht werden, welches Maß hier noch akzeptiert wird. Andererseits sollte bedacht werden, dass auch ein perfektes Objektiv in fast allen Fällen der sogenannten natürlichen Vignettierung unterliegt und dementsprechend einen $\cos^4$ Abfall der Bestrahlungsstärke mit dem Bildfeldwinkel nach sich zieht.

Verzeichnung: Verzeichnungen können im Prinzip durch Kalibrierung und nachträglichen Ausgleich per Software reduziert werden. Je stärker die notwendige Korrektur aber wird, desto mehr Aufwand ist hierfür zu fordern. Für messende Aufgaben reduziert man die Probleme daher gerne, indem man verzeichnungskorrigierte Objektive verwendet.

Für gewöhnliche visuelle Betrachtungen sind Verzeichnungen von einigen Prozent unproblematisch (Ausnahme: Szenen mit langen parallelen Strukturen). In der Bildverarbeitung sind Verzeichnungen meist deutlich problematischer, insbesondere wenn geometrische Größen, z.B. Abstände oder Durchmesser, gemessen werden sollen. Hierbei sind oftmals Abweichungen von Subpixeln also Zehntel oder Hundertstel Promille des Bildfelds von Bedeutung und kleinste Verzeichnungen wirken sich störend aus.

In aller Regel wird man für solche Anforderungen eine Korrektur der Verzeichnung bzw. Kalibrierung des Felds vornehmen müssen. Wenn die Verzeichnung aber vergleichsweise klein ist (Promille-Bereich) dann ist es ausreichend, eine einfache lineare Korrektur vorzunehmen. Dementsprechend sollte man nicht denken, dass wenn sowieso eine Korrektur oder Kalibrierung notwendig ist, dann jegliche Verzeichnungsparameter egal sind.

Eine absolut verzeichnungsfreie Abbildung ergibt sich (automatisch) bei einem komplett symmetrischen Abbildungssystem (Abb. 6.1.1). Allerdings ist zu beachten, dass eine perfekte Symmetrie eben auch nur gelingt, wenn es sich um eine

1:1 Abbildung mit gleichem Objekt- und Bildabstand handelt. Eine weitere Möglichkeit ist die Lochkamera, die aber außer für extreme Spezialanwendungen aufgrund der prinzipbedingten Unschärfe und extremen Lichtschwäche kaum einsetzbar. Sehr gute Verzeichnungseigenschaften haben üblicherweise telezentrische Bildverarbeitungsobjektive, da typischerweise Benutzer, die Telezentrie benötigen, eine gute Verzeichnungskorrektur zu schätzen wissen (meist handelt es sich um messende Aufgabenstellungen).

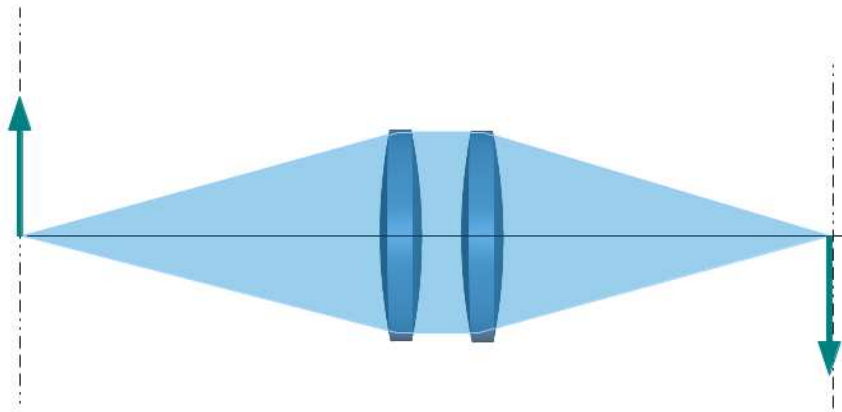


Abbildung 6.1.1: Symmetrische Systeme vermeiden jegliche Verzeichnungen

Streulichtempfindlichkeit und Beschichtung: Streulicht kann einerseits bei der Abbildung selbst durch ungewollte Reflexionen und Streuungen im Innern des Objektivs auftreten. Andererseits kann ein Objektiv empfindlich oder unempfindlich gegen das schräge Eindringen von zusätzlichem Fremdlicht/Streulicht sein. Eine Schwärzung der Linsenränder und der zusätzliche Einbau von Blenden, aber auch die passende Antireflexbeschichtung der Linsen führt zu einer generellen Verbesserung des Kontrasts bzw. Verminderung des Streulichts. Teilweise kann die Empfindlichkeit durch eine aufgesetzte Kappe (lens hood) reduziert werden.

Die Antireflexbeschichtungen müssen zur Wellenlänge des genutzten Lichts passen. Hierdurch lassen sich bei breitbandigen Beschichtungen die üblichen 4% Reflexionen pro Fläche bei senkrechtem Lichteinfall auf ca. 0,5 % reduzieren. Eine weitere Reduktion ist möglich, wenn der Wellenlängenbereich eingeschränkt. Die Grundidee der Beschichtung ist die Interferenz des an der Vorderseite der Beschichtung und der Hinterseite der Beschichtung reflektierten Lichts, so dass sich destruktive Interferenz ergibt (Abb. 6.1.2).

Ebenheit des Felds bzw. Bildfeldwölbung/Objektfeldwölbung: im Prinzip sind



Abbildung 6.1.2: Prinzip einer Antireflexbeschichtung.

wir bei unseren Überlegungen immer von ebenen Objekt- und Bildfeldern ausgegangen. Der Schärfentiefenbereich gibt somit ein Messvolumen im Objektraum um diese Ebene an. Oftmals ist das Objektfeld aber gewölbt. Dies kann zu Problemen führen und muss ggf. beachtet werden.

6.2 Foto- und Bildverarbeitungsobjektive

Der grundsätzliche Aufbau von üblichen Bildverarbeitungsobjektiven ist derselbe wie bei Fotoobjektiven. Lediglich die spezielle Optimierung (insbesondere auf einen nahen Arbeitsabstand und speziellen Wellenlängenbereich) sowie die mechanischen Parameter (Feststellung, Anschlußgewinde) unterscheiden die Typen. Die grundsätzlichen Bezeichnungen sind allerdings gleich.

Objektive, die einen Feldwinkel größer $60 \dots 70^\circ$ erfassen werden meist als *Weitwinkelobjektive* bezeichnet. Wenn noch deutlich größere Feldwinkel erfasst werden spricht man von *Hyperfeldwinkeln* oder im Extremfall von nahezu 180° oder mehr von *Fisheye-Objektiven*. Mit entsprechenden Objektiven lassen sich sehr große Szenen auf den Bildsensor abbilden und entsprechend werden sie z.B. stark in der Überwachungstechnik eingesetzt. Wenn die Brennweite eines Objektivs in etwa der Diagonale des Bildsensors entspricht werden Objektive als *Normalobjek-*

tiv bezeichnet. Dadurch ergibt sich ein Feldwinkel von ca. 45° .

Wenn die Brennweite länger als die Baulänge ist, dann spricht man von einem *Teleobjektiv*. Der sogenannte *Telefaktor* bezeichnet gerade das Verhältnis von Brennweite zu Baulänge. Ein Telefaktor größer 1 wird erreicht, indem eine Kombination aus einer sammelnden und einer zerstreuenden Baugruppe (negative Brennweite) verwendet wird. Die zerstreuende Baugruppe liegt dabei relativ nah bei der Bildebene (Abb. 2.2.7).

Der umgekehrte Fall wird *Retrofokusobjektiv* genannt und vergrößert den Abstand zur Bildebene. Dadurch kann zusätzlicher Bauraum (z.B. für Filter) geschaffen werden. Je kleiner die Sensoren und damit auch die Brennweiten von Bildgebungssystemen werden, desto eher ist eine Retrofokuskonstruktion notwendig, da ansonsten kaum noch genug Platz zwischen letztem Objektivelement und Bildsensor bleibt.

Oftmals werden noch Zwischenringe zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von Objektiven empfohlen. Der Zwischenring wird zwischen Kamera und Objektiv angebracht und ändert somit die Bildweite. Damit ändert sich automatisch auch der Abbildungsmaßstab. Während dieses Vorgehen bei geringeren Anforderungen an die Auflösung sinnvoll ist, ist der Einsatz bei den heute üblichen hohen Auflösungen kaum zu empfehlen. Die Objektive sind schlicht für einen anderen Anwendungsfall, also ohne Zwischenring, optimiert und dementsprechend kann die spezifizierte Abbildungsqualität mit dem Zwischenring nicht erreicht werden.

Das in Abbildung 5.6.14 dargestellte Doppelgauß Objektiv kann als typisches Design eines entozentrischen Bildverarbeitungsobjektivs angesehen werden². Es wurde für die Blendenzahl 3 bei einem Arbeitsabstand von 500 mm und polychromatische Anwendung im sichtbaren Spektralbereich optimiert. Allerdings sind keine Toleranzen berücksichtigt, so dass reale Objektive meist nicht die angegebene Qualität erreichen.

Generell sind beim Einsatz von Fotoobjektiven für industrielle Kameras die Bildfelder zu beachten. Klassische Fotoobjektive für analoge Filmaufnahmen sind für ein Filmformat von 36 x 24 mm optimiert. Wenn sie mit einem vergleichsweise kleinen Sensor verwendet werden, dann wird entsprechend nur ein kleiner Teil des Bildfelds verwendet. Dies ist im Prinzip zunächst kein Problem, beachtet wer-

²Es basiert in der hier verwendeten Form auf einem abgewandelten Beispieldesign aus Zemax.

den muss aber, dass von der Abbildungsleistung des Objektivs nur ein kleiner Teil genutzt wird. Eine gute bis sehr gute typische klassische Filmobjektivauflösung liegt in der Größenordnung von 30 bis 50 Linienpaaren pro Millimeter. Für moderne Bildverarbeitungsbildsensoren mit typischen Pixelgrößen im Bereich von $5\text{ }\mu\text{m}$ ist das bei weitem nicht ausreichend.

Darüber hinaus sind die Objektive oft weit ab von einer bildseitigen Telezentrie. Dementsprechend sind die Hauptstrahlen für außeraxiale Bildpunkte geneigt. Dies führt in Zusammenhang mit den vor den meisten Bildsensoren liegenden Mikrolinsen unter Umständen zu Vignettierung und Übersprechen der Pixel (vgl. Abschnitt ??).

Bei Bildverarbeitungsobjektiven gibt es nicht immer eine Möglichkeit zur Fokussierung am Objektiv sondern es wird teilweise davon ausgegangen, dass mittels des Objektabstands fokussiert werden kann. Dies muss bei der Auswahl bedacht werden.

6.3 Telezentrische Objektive

Die Vorteile der Telezentrie wurden bereits in Kapitel 2 klar dargestellt. Insofern werden telezentrische Objektive gern und oft vor allem in der messenden Bildverarbeitung eingesetzt. Dabei ist aber zu beachten, dass der Bereich, in dem die Telezentrie ausreichend gut funktioniert oft vergleichsweise klein. Daher sollte man beim Einsatz eines entsprechenden Objektivs die entsprechende Spezifikation genau prüfen und diese entsprechend einhalten. Bei der Angabe des Bereichs ist darauf zu achten, welche Größenänderung (z.B. $10\text{ }\mu\text{m}$) diesem Bereich entspricht. Da der Telezentriefehler sehr klein, aber dennoch von Bedeutung ist, ist oftmals eine Messung notwendig. Eine Vorgehensweise hierzu ist in [18] zu finden. Keilförmige Kalibrierobjekte zur exakten Bestimmung sind kommerziell verfügbar³.

Zu unterscheiden ist zwischen objektseitig und beidseitig telezentrischen Objektiven. Bei letzteren ist zusätzlich der Strahlengang sensorseitig parallel (siehe Abb. ??). Dadurch ist der Einfallswinkel des Strahlkegels auf den Sensor (bzw. dessen Mikrolinsen) unabhängig von der Feldposition, so dass keine sensorseitigen Vi-

³z.B. bei Edmund Scientific

gnetztungen auftreten und auch das etwaige optische Übersprechverhalten zwischen benachbarten Pixeln minimiert und feldunabhängig wird. In der Regel sind Objektive, die für den Betrieb mit aktuellen digitalen Bildsensoren angeboten werden zumindest näherungsweise bildseitig telezentrisch.

Teilweise werden auch “Teilelezentrische Objektive” angeboten. In diesem Fall ist der Telezentriefehler zwar vergleichsweise hoch, der Telezentriebereich ist aber dennoch deutlich erweitert gegenüber einem konventionellen entozentrischen Objektiv.

6.4 Objektive für Zeilenkameras

Für die Abbildung auf eine Zeilenkamera kann natürlich ein gewöhnliches Objektiv eingesetzt werden. Genutzt wird die Abbildungsleistung dann eben nur für eine Zeile. Andererseits gibt es aber speziell für die Abbildung einer Zeile optimierte Objektive, die natürlich für diesen Fall dem konventionellen Objektiv in der Abbildungsqualität überlegen sind.

6.5 Mikroskopische Abbildungen

Für vergrößernde Abbildungen werden heute üblicherweise Keplerteleskope mit speziellen, für die mikroskopische Abbildung optimierten Objektiven (*Mikroskopobjektive*) verwendet. Der Grundaufbau einer mikroskopischen Abbildung ist in Abb. ?? dargestellt.⁴ Das Objektiv ist dabei für eine Abbildung ins Unendliche optimiert⁵ und eine nachfolgende, vergleichsweise einfache Linse bildet dann das Zwischenbild aus dem Unendlichen auf den Bildsensor ab. Diese sogenannte Tubuslinse sollte idealerweise zum verwendeten Mikroskopobjektiv passen, um eine bestmögliche Abbildungsqualität zu erreichen. In guter Näherung sind die meisten Mikroskopobjektive telezentrisch aufgebaut.

Ein genaues Verständnis der Kennzeichnung bzw. Spezifikation von entsprechen-

⁴Es gibt auch Objektive, die für einen Einsatz ohne Tubuslinse optimiert sind. In diesem Fall ist der Arbeitsabstand aber etwas kürzer und vor allem können keine dicken Filter oder Strahlteiler eingebracht werden da kein kollimierter Strahlengang vorliegt.

⁵Alte Mikroskope wurden auf einen festgelegte Position, z.B. 160 mm, des Bilds optimiert.

den Objektiven ist unerlässlich wenn hohe Fehlinvestitionen vermieden werden sollen denn Mikroskopobjektive können durchaus schnell mehrere tausend Euro kosten.

Das Verhältnis der Brennweiten von Tubuslinse und Objektiv ergibt den Abbildungsmaßstab. Die Angabe der “Vergrößerung” auf den Objektiven kann dementsprechend in eine Brennweite umgerechnet. Die Brennweite eines Zeiss Objektiv mit 100-facher Vergrößerung wird aufgrund der bei Zeiss üblichen Tubuslinsebrennweite von 165 mm letztlich 1,65 mm.⁶

Die zweitwichtigste Angabe zur Spezifikation eines Mikroskopobjektivs ist die (objektseitig) numerische Apertur, die letztlich der Blendenzahl bei anderen Objektiven entspricht. Generell gilt, dass Objektive mit starken “Vergrößerungen” ein kleines Objektfeld abdecken und Objektive mit hoher numerischer Apertur eine geringe Feldausdehnung und eine sehr kleine Schärfentiefe ($\Delta z \approx \lambda/NA^2$) aufweisen.

Neben diesen beiden Grundparametern (Vergrößerung und numerische Apertur) sind eine Reihe weiterer Angaben von Belang.

Erfreulicherweise für die Bildverarbeitung sind Mikroskopobjektive in der Regel mehr oder weniger telezentrisch.

- Immersion: Wird das Objektiv in Luft verwendet oder handelt es sich um ein sogenanntes Immersionsobjektiv. Der Vorteil ist die dadurch vergrößerte numerische Apertur ($NA = n \sin \alpha$). Mit “W” werden Wasserimmersionsobjektive gekennzeichnet während ein Arbeiten in Öl mit “oil” gekennzeichnet wird. Wenn keine spezielle Angabe erfolgt, dann ist das Immersionsmedium Luft. Weitere gebräuchliche Immersionsmedien sind Wasser (“W”) und Glycerin (“GLYC”).

Ein Einsatz des Objektivs mit dem falschen Immersionsmedium führt zu massiven (sphärischen) Aberrationen und sollte tunlichst vermieden werden.

- Deckglas: In der Mikroskopie ist es in vielen, vor allem biomedizinischen Anwendungen üblich und sinnvoll, das Präparat durch eine Deckglas abzudecken. Die Deckglasdicke hat dabei erneut einen massiven Einfluss auf die Abbildung und dementsprechend muss die Deckglasdicke bei der Optimierung

⁶Die Vergrößerung wird auf den Objektiven auch durch einen farblichen Ring gekennzeichnet, siehe DIN 8578.

des Objektivs berücksichtigt werden. Wie auch bei der Immersion führt die falsche Deckglasdicke zu einer deutlich reduzierten Abbildungsqualität.

- Tubuslänge: Für Objektive mit einem Zwischenbild (welches üblicherweise dann visuell durch ein Okular betrachtet wird) wird die Tubuslänge in mm gefolgt von der Deckglasdicke angegeben. Also z.B. "160/0.17". Für Objektive ohne endliches Zwischenbild wird ∞ angegeben.
- Long Working Distance (L, LD oder LDW) Objektive erzielen einen deutlich vergrößerten Arbeitsabstand. Dies kann ein deutlicher Vorteil sein, denn hochaperturige Mikroskopobjektive haben oft einen Arbeitsabstand von wenigen hundert Mikrometern.
- Polarisation: Für quantitative Polarisationsmikroskopie sind ebenfalls spezielle Objektive notwendig ("POL", "P" oder "PO").

Daneben sind die Ebenheit des Objektfelds ("Plan" oder "PL") und die chromatische Korrektur⁷ wesentliche Merkmale, die den Preis eines Mikroskopobjektivs bestimmen. Für spezielle Mikroskopieverfahren, insbesondere die Abbildung von transparenten Objekten werden verschiedene Phasenkontrastobjektive angeboten⁸. Für die doch im Rahmen der industriellen Bildverarbeitung doch recht spezielle Anwendung entsprechender Verfahren wird hier nicht eingegangen.

Teilweise wird die Gesamtkorrektur der Aberration durch die Kombination von Mikroskopobjektiv und Tubuslinse erzielt. Ist dies der Fall dann sollte natürlich die passende Kombination beider Komponenten verwendet werden. für Bildverarbeitungsanwendungen sind einfache Tuben erhältlich, bei denen bereits ein Mikroskopobjektiv und eine dazu passende Tubuslinse integriert sind und an die direkt ein passender Bildsensor angeschraubt werden kann. Extern ist dann lediglich eine passende Beleuchtung sowie geeignete mechanische Verstellmöglichkeit vorzusehen.

Die sehr übliche Dunkelfeldbeleuchtung (vgl. Abschnitt 8.1.1) kann mit konventionellen Objektiven realisiert werden, oft werden aber auch spezielle Dunkelfeldobjektive eingesetzt.

⁷Eine gebräuchliche Bezeichnung ist "Apochromat". Dadurch wird zum Ausdruck gebracht, dass drei Wellenlängen (im sichtbaren Bereich) gleichzeitig korrigiert sind, allerdings natürlich nicht, wie gut die Abbildungsleistung bei diesen Wellenlängen wirklich ist.

⁸"DIC" oder "PH"

Die Preise von Mikroskopobjektiven variieren sehr stark denn sehr gute Abbildungsleistungen über große Felder lassen sich nur mit sehr hohem Aufwand realisieren. "Apochromate" ergeben dabei bessere Abbildungsergebnisse als Achromate. "Plan" Objektive erzielen ein ebenes Objektfeld. "Epi" oder "M" bedeutet Auflicht (im Gegensatz zur in der Biologie traditionellen Durchlichtmikroskopie ('Kurzzeichen: "D").

6.6 Scheimpflug Bedingung

Wenn die Bildebene zur Objektebene bei einer Abbildung verkippt ist, dann ergibt sich das Problem, dass hierdurch verschiedene Bereiche auf dem Objekt in unterschiedlicher Entfernung liegen und dementsprechend Teile eines ausgedehnten Objekts unter Umständen unscharf abgebildet werden. Ob dies der Fall ist kann mit der Abschätzung der Schärfentiefe (vgl. Abschnitt 2.4) getestet werden.

Falls die Schärfentiefe ein Problem ist, kann durch Verkippen des Objektivs ein entsprechend verkipptes scharfes Objektfeld generiert werden. Hierzu wird die Senkrechte zur Symmetrieachse des Objektivs so gelegt, dass ihre Verlängerung durch den Schnitt der Objektebene und der Bildebene verläuft (vgl. Abb. ??).

Zu beachten ist allerdings, dass sich eine deutliche Verzerrung des Bildes ergibt, die per Software ausgeglichen werden muss.

6.7 Filter und Schutzgläser

Schutzgläser und Filter werden aus verschiedenen Gründen eingesetzt. Generell unterscheiden wir zwischen:

- Schutzgläsern, z.B. zur Abschirmung von Dreck oder hohen Drücken,
- Spektralfiltern, meist zur Unterdrückung von Fremdlicht oder zur spektralen Analyse,
- Polarisationsfiltern zur Unterdrückung oder Hervorhebung von Reflexionen
- Graufiltern zur reinen Lichtabschwächung

Zu beachten ist, dass ein zusätzliches Glas vor dem eigentlichen Objektiv in aller Regel im Optikdesign nicht berücksichtigt ist. Minderwertige Filter mit leichten Unebenheiten führen natürlich in jedem Fall zu Bildfehlern. Aber auch eine perfekte Planparallelplatte führt beim nicht-Parallelen Durchgang zu Fehlern (Defokus, sphärische Aberration, Astigmatismus). Je paralleler der auf das Objektiv einfallende Strahlverlauf ist, desto unkritischer ist diese zusätzliche Planparallelplatte wenn sie in hoher Qualität ausgeführt ist. Insbesondere bei geringen Blendenzahlen in Verbindung mit geringen Objektdistanzen sollte die Wirkung beachtet werden. Auch bei parallelem Strahlverlauf (also großer Blendenzahl) können sich aber (leichte) Verzeichnungen ergeben. Die Effekte sind umso stärker, je dicker der Filter ist.

6.7.1 Farbfilter

Grundsätzlich unterscheidet man bei spektralen Filtern zwischen

Tiefpass: (in Reflexion: Hot mirrors), d.h. tiefe Frequenzen, also große Wellenlängen, werden durchgelassen.

Hochpass: (in Reflexion: Cold mirrors), d.h. hohe Frequenzen, also niedrige Wellenlängen, werden durchgelassen, z.B. als IR-Sperrfilter vor Bildsensoren.

Bandpass: Ein gewisser Spektralbereich wird transmittiert, z.B. zur Sichtbarmachung spezieller spektraler Details mit hohem Kontrast.

Bandsperre: (Notch-Filter): Ein bestimmter Bandbereich wird geblockt, z.B. zur Blockierung einer zur Anregung verwendeten Laserwellenlänge.

Komplexere Charakteristiken: Mehrere Spektralbänder werden transmittiert (z.B. Blau und Rot, nicht aber grün).

und ob die Filter in Transmission oder Reflexion genutzt werden.

Oftmals kann man durch den Einsatz geeigneter Filter den Einsatz einer Farbkamera und einer Farbbildverarbeitung vermeiden und sehr gute Kontraste erzielen. Unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen kann man allerdings auch statt einer abbildungsseitigen Farbfilterung eine Beleuchtung mit entsprechender spektraler Charakteristik verwenden. Diese kann entweder ebenfalls über Farbfilter, oder aber mittels passender LED-Beleuchtung realisiert werden.

Neben dem Verlauf der spektralen Charakteristik ist auch auf die generelle Transmission im Passbereich zu achten.

Die Funktionsweise von Farbfiltern basiert entweder auf Absorption oder aber Interferenz. Absorbierende Filter haben vergleichsweise breite Transmissions- bzw. Reflektionscharakteristiken und setzen die zu filternde Strahlung in Wärme um. Die dadurch bei hohen Lichtleistungen entstehende Wärme kann zu verschiedenen praktischen Problemen führen und muss dann durch Luftkonvektion oder Wasserkühlung abgeführt werden. Abbildungsseitig können die sich dabei ergebenden Schlieren in der Luft bzw. dem Wasser zu erheblichen Aberrationen und damit einer erheblichen Bildqualitätsminderung führen. Entsprechende Filterelemente sind aber preiswert, arbeiten nahezu winkelunabhängig und bieten eben breite Spektralcharakteristika.

Schmalbandige und sehr steile Filterkennlinien werden dagegen üblicherweise durch Interferenzfilter⁹ realisiert. Die generelle Funktionsweise ist ähnlich der Farbentstehung an Seifenblasen, d.h. dünne Schichten unterschiedlicher Brechzahl, die auf ein Trägermaterial (Glas oder Kunststoff) aufgebracht sind führen zu Reflexionen an den Schichtgrenzen und die Interferenz der entsprechenden Lichtanteile ist wellenlängenabhängig.

Hierbei ergibt sich eine mehr oder weniger starke Abhängigkeit der spektralen Charakteristik mit dem Winkel. Durch leichte Variation des Winkels, unter dem der Filter verwendet wird, kann die (zentrale) Wellenlänge eingestellt werden. Es gilt:

$$\lambda_{phi} = \lambda \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{n^2}} \quad (6.1)$$

Typische Halbwertsbreiten von Interferenzfiltern liegen im Bereich von 5...100 nm so dass auch breitbandiges Fremdlicht sehr effektiv von der eigentlichen Beleuchtungswellenlänge (Laser oder LED) getrennt werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Transmission, die im Durchlassbereich möglich ist (> 90%).

Achten Sie darauf, dass teilweise die Filtercharakteristik nur sehr ungenau garantiert ist und dann z.B. die Zentralwellenlänge um bis zu 20 nm schwanken kann.

⁹Von "Dichroiten Filtern" spricht man bei Interferenzfiltern, wenn ein ausgedehntes Spektralband transmittiert und das (farb-)komplementäre Feld reflektiert wird. Im Prinzip ist das allerdings für alle Interferenzfilter gegeben.

Die Dämpfung in Sperrbereichen von Filtern wird üblicherweise als “Optische Dichte” (Optical Density) logarithmisch angegeben, d.h. ein OD 3 Filter führt zu einer Abschwächung um den Faktor $10^3 = 1000$.

a

6.7.2 Schutzgläser

Bei verschiedenen Anwendungen können Schutzgläser essentiell für die Sicherung der Funktionsweise der Abbildungsoptik sein. Verschmutzungen (z.B. Ölnebel, Staub) oder Umgebungsbedingungen (z.B. hohe Temperatur, Drücke) sind oftmals von der Optik oder dem Rest des BV-Systems abzuschirmen.

6.7.3 Polarisationsfilter

Typischerweise werden in der Bildverarbeitung auf Absorption basierende Polarisationsfilter eingesetzt. Hauptnachteil ist, dass auch ein Teil des an sich zu transmittierenden Lichts absorbiert wird. Die Lichteffizienz also negativ beeinflusst wird und das Element kann überhitzen. Kristallpolarisatoren vermeiden diese Nachteile, sind aber in der Bildverarbeitung aufgrund des sehr hohen Preises nicht üblich.

Wie bei jedem Filter ist zunächst die Qualität des Substrats entscheidend. Inhomogenitäten der Dicke oder des Materials führen zu Aberrationen. Weiterhin ist teilweise wichtig, wie das Auslöschungsverhältnis von gewolltem zu ungewolltem Licht ist.

6.8 Infrarotoptiken

Natürlich ist es problematisch, Objektive deutlich außerhalb ihrer Spezifikation zu betreiben. Dementsprechend ist es meist wenig sinnvoll, die Wellenlängen deutlich anders als für das Objektiv spezifiziert zu wählen. In einem Teil des nahen Infrarot (780 - 1100 nm) können oft noch konventionelle Objektive eingesetzt werden. Es ergibt sich zwar eine verringerte Abbildungsqualität und auch die Transmission ist (aufgrund der unpassenden Beschichtungen der Linsen) oft verringert,

dennoch ist eine sinnvolle Abbildung möglich.

Problematischer sind natürlich deutlich längere Wellenlängen. Oftmals kommt erschwerend hinzu, dass der Wellenlängenbereich sehr groß ist und daher die Korrektur chromatischer Aberrationen schwierig wird. Da im mittleren und längeren Infrarot meist aber auch die Auflösung des Bildsensors deutlich reduziert ist, kommt man dennoch zu ausgewogenen Systemen.

6.9 Reinigung und Pflege

Verschmutzungen können die Abbildungsleistung von Optiken erheblich beeinträchtigen. Daher kann es notwendig werden, die Optiken zu reinigen. Verschmutzungen, die in bzw. nahe der Bildebene oder einer Zwischenbildebene liegen, zeigen sich als lokalisierte Defekte im Bild. Oft stellt sich die Frage, ob der Bildsensor selbst verschmutzt ist. Dies kann einfach durch Rotation des Sensors gegenüber dem Rest der Optik untersucht werden. Bleibt die Position der Verschmutzungen im Bild erhalten dann kann davon ausgegangen werden, dass der Bildsensor selbst verschmutzt ist.

Verschmutzungen, die in anderen Ebenen auftreten führen zu einer Kontrastminderung des Bildes aufgrund von Streulicht.

Generell gilt, dass die Reinigung von Optiken nur erfolgen sollte, wenn es unbedingt notwendig ist. Daher ist oberste Priorität, die Verschmutzung zunächst zu vermeiden. Im Zweifelsfall sollten sie passende Handschuhe bei der Montage/Justage tragen, denn insbesondere Fingerabdrücke können vergleichsweise schlecht entfernbare Verschmutzungen erzeugen. Ebenfalls zur Prävention können Schutzfilter vor dem eigentlichen Objektiv verwendet werden. Bei Nichtbenutzung sollten die Optiken abgedeckt werden (im einfachsten Fall durch Objektivdeckel).

Verschmutzungen können teilweise auch durch geeignete Luftführung im Betrieb vermieden werden, z.B. durch Schutzgase, die einen leichten Überdruck eines gehausten Inspektionssystem erzeugen. Typischerweise sollten Objektive eher nach unten gerichtet eingebaut werden sich Staub dann deutlich reduziert auf der Frontlinse absetzt.

Sollte dennoch eine Reinigung notwendig werden sind einige generelle Dinge zu beachten, um Beschichtungen nicht zu zerstören und nicht oberflächliche Verschmutzungen zu unwiderbringbaren Fehlern zu machen. Details finden sich in [19] und für den speziellen Fall von Mikroskopobjektiven in [20].

- Es sollte immer mit der wenigsten aggressiven Behandlung begonnen werden. Ein typischer Start ist das Abblasen mit einem speziellen Blasebalg. Hierdurch soll schlecht anhaftender Staub oder andere partikuläre Verschmutzungen entfernt werden.

Teilweise wird auch Druckluft verwendet. Wenn der Druck zu hoch ist, ist dieser Ansatz allerdings gefährlich, denn er kann dazu führen, dass harte Partikel auf der Oberfläche in die Oberfläche eingetrieben werden und so zu Kratzern führen.

- Fingerabdrücke sollten möglichst schnell entfernt werden.
- Zunächst wird Isopropanol oder eine spezielle Linsenreinigungsflüssigkeit verwendet, um die Oberfläche weiter zu säubern. Hierzu wird mit einem Papierlinsenputztuch ein Tropfen der Reinigungsflüssigkeit so langsam abgezogen, dass an der Begrenzung des Linsenputztuchs die Reinigungsflüssigkeit gerade verdunstet. Natürlich ist das Papierreinigungstuch entsprechend der Linsengeometrie zu zuschneiden.
- Hartnäckigerer Schmutz kann mit Aceton behandelt werden. Hierbei besteht aber bereits eine deutlich vergrößerte Gefahr der Beschädigung von Beschichtungen. Insbesondere kann dadurch auch Material der Linsenbefestigung angegriffen bzw. aufgelöst werden, das sich dann im ungünstigsten Fall über die Linse verteilt.
- Lokale Verschmutzungen auf sehr kleinen Optiken (Mikroskopobjektive) reinigt man am besten mittels speziellen Baumwollstäbchen oder synthetischen Putzstäbchen (keinesfalls konventionelle Q-Tipps verwenden).

Kapitel 7

Fotometrie und Radiometrie

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Wie basierend auf einer physikalischen Strahlungsbeurteilung photometrische Größen abgeleitet bzw. berechnet werden.
- Welche photometrischen und radiometrischen Grundgrößen von Bedeutung sind.
- Wie man die Bestrahlungsstärke auf dem Bildsensor berechnet.
- Wie man ein Objekt beleuchten muss, um eine gewisse Bestrahlungsstärke auf einem Sensor zu erzielen.

7.1 Lichttechnische Größen

Die Lichttechnik ist ein eher unübersichtliches und wenig geliebtes Gebiet der Bildverarbeitung. An sich sind die wichtigsten Zusammenhänge gut überschaubar. Im wesentlichen sind vier Grundgrößen für uns wesentlich. In der Praxis ergeben sich aber eine Vielzahl von Bezeichnungen und Einheiten denn diese Grundgrößen werden sowohl radiometrisch, also mittels SI-Einheiten, als auch photometrisch, also in Bezug auf das menschliche Sehsystem definiert. Somit ergeben sich bereits acht Größen und üblich sind sowohl englische als auch deutsche Bezeichner und historisch bedingt sehr viele verschiedene Einheiten¹.

¹Details siehe DIN 5031)

Die Wellenlängen von für den Menschen sichtbarem Licht liegen im Bereich von ca. 400 bis 700 nm (siehe Abb. 7.1.1)². Ultraviolettes Licht entspricht kürzeren Wellenlängen (ca. 100 bis 400 nm) und das infrarote Licht liegt oberhalb des sichtbaren Bereichs.

Man könnte der Ansicht sein, dass diese Empfindlichkeit des menschlichen Sehsystems für uns ohne Belang ist, denn es geht in der industriellen Bildverarbeitung um maschinelles Sehen. Aus zweierlei Gründen ist dies nicht der Fall. Zum einen erfolgt die Spezifikation vieler Beleuchtungsquellen und auch Kameraempfindlichkeiten oft in Einheiten, die auf das menschliche Sehsystem bezogen sind. Insofern ist eine Kenntnis der entsprechenden Einheiten von Bedeutung. Zum anderen haben aber natürlich auch technische Detektoren eine spektrale Empfindlichkeit. Abb. ?? zeigt eine typische Empfindlichkeitskurve eines kommerziellen CCD Bildsensors. Dementsprechend gelten die grundlegenden Zusammenhänge, die sich bei menschlichen Sehen ergeben genauso für technische Systeme. Der einzige Unterschied ist die veränderte spektrale Empfindlichkeit, die wir durch $V(\lambda)$ bezeichnen.

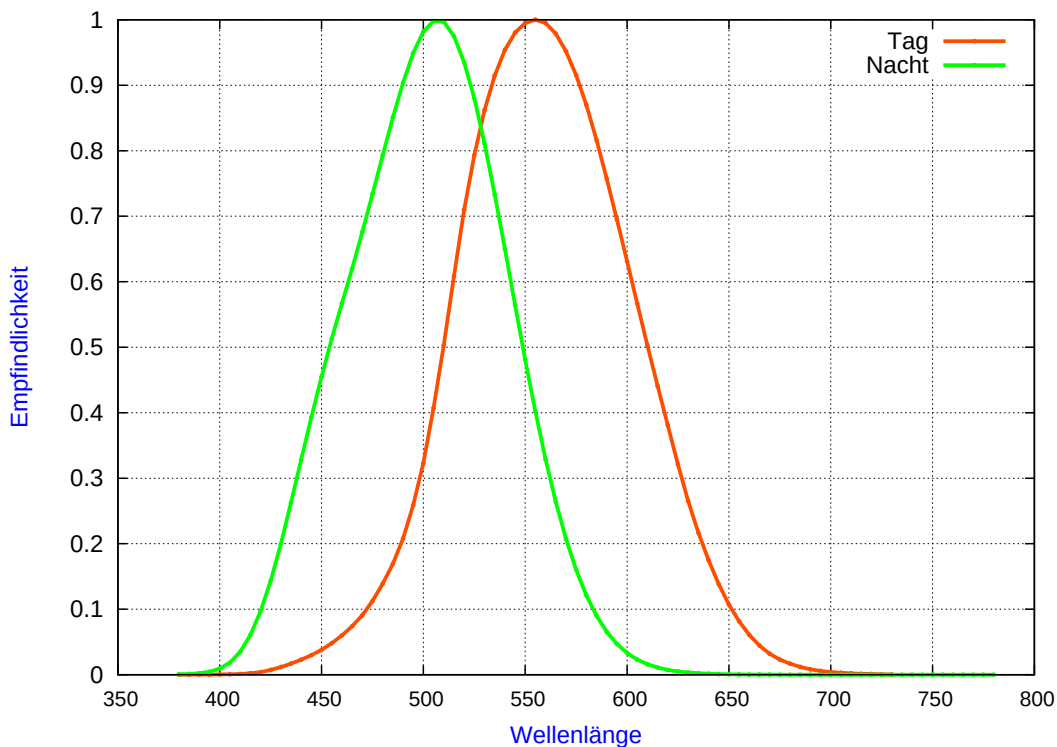


Abbildung 7.1.1: Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Tagsüber liegt die maximale Empfindlichkeit bei ca. 550 nm (gelbgrün), nachts verschiebt sie sich in den blaugrünen Bereich (Purkinje-Effekt). Die Kurven sind jeweils normiert. Nachts ist die Empfindlichkeit natürlich erhöht.

²Nach der DIN Norm 5013 genauer: 380 bis 780 nm

Die Reaktion eines lichtempfindlichen Sensors auf ein beliebiges Eingangsspektrum $\Phi_e(\lambda)$ lässt sich als *Überlappintegral* zwischen der normierten spektralen Empfindlichkeit $V(\lambda)$ und dem Eingangsspektrum $\Phi_e(\lambda)$ berechnen:

$$\Phi(\lambda) = K_M \int_0^\infty V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (7.1)$$

Wenn wir als Einheit für das Eingangsspektrum Watt verwenden, dann ergibt sich für das Ergebnis Φ ebenfalls die Einheit Watt, wenn die Empfindlichkeit V als einheitsloser Gewichtungsfaktor betrachtet wird.

Da nun aber die Größe Φ auf das menschliche Sehen bezogen ist, wäre eine solche physikalische Einheit ungünstig. Stattdessen wird eine weitere Einheit eingeführt. Um die Konversion von dieser Einheit *Lumen* (lm) auf Watt durchzuführen benötigt man den Konversionsfaktor (genauer: *photometrisches Strahlungsäquivalent* K_M). Die Einheit dieses Faktors muss dann lm/W sein. Aus historischen Gründen ist der numerische Wert nicht 1 lm/W sondern 683 lm/W. Eine Strahlungsleistung von 1 W im gelb-grünen Spektralbereich ($V(555\text{nm}) \approx 1$) führt somit zu einem Lichtfluss von 683 lm.³

Auf diese Weise kann sehr einfach zwischen beliebigen *radiometrischen Größen*, die in physikalischen Einheiten gegeben sind, auf *fotometrische Größen* umgerechnet werden. Man unterscheidet also zwischen *Fotometrie*, mit auf das menschliche Sehsystem bezogenen Größen und der *Radiometrie*, in der rein energetische Größen Verwendung finden und ganz entsprechend kann auch mit einer veränderten Empfindlichkeit auch das Verhalten von anderen Bildsensoren berechnet bzw. spezifiziert werden.

Verschiedene Größen sind dabei von Belang und finden sich in den technischen Daten von Beleuchtungsquellen. Grundsätzlich werden die selben Symbole bzw. Variablennamen für radiometrische und fotometrische Größen verwendet. Zur Unterscheidung der beiden Systeme bekommt die radiometrische Größe jeweils ein “e” als Subscript (“e” für “energetic”).

Unsere Basisgröße ist der *Lichtfluss* Φ . Er entspricht – auf das Auge bezogen – der gesamten *Strahlungsleistung* Φ_e . Seine Einheit ist das Lumen.

³Da die Empfindlichkeit des menschlichen Sehsystems bei schlechten Lichtverhältnisse (nachts) doch deutlich verändert ist (erhöhte Empfindlichkeit und spektrale Empfindlichkeit blau-verschoben) kann auf die Augempfindlichkeit dann mit einem anderen Konversionsfaktor (1699 lm/W statt 683 lm/W) umgerechnet werden. Entsprechend werden alle lichttechnischen Größen im Prinzip sowohl für das Tag- als auch das Nachtsehen definiert (vgl. DIN 5031).

Die *Beleuchtungsstärke* E ist der Lichtfluss pro Flächeneinheit (vgl. Abb. 7.1.2):

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (7.2)$$

In radiometrischen Größen sprechen wir von der *Bestrahlungsstärke* E_e , die eben ganz entsprechend die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit ist.⁴

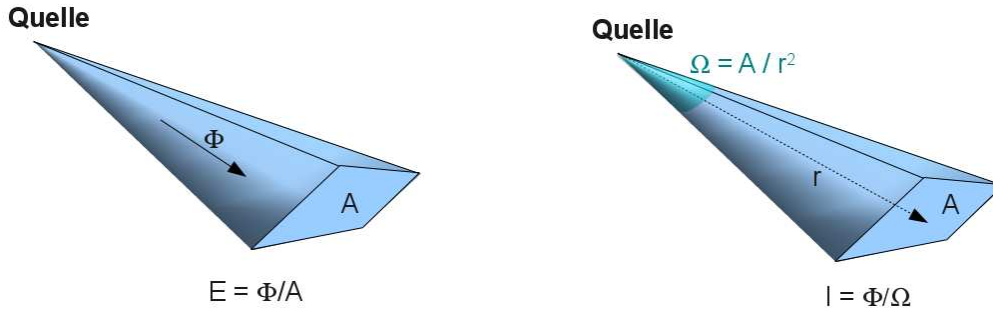


Abbildung 7.1.2: Links: Die Beleuchtungsstärke (Bestrahlungsstärke) E ist der Lichtfluss (Strahlungsfluss) pro Flächeneinheit. Rechts: Die Leuchtstärke (Strahlstärke) I ist definiert als der Lichtfluss (Strahlungsfluss) pro Raumwinkel.

Die Definition der fotometrischen bzw. radiometrischen Größen gilt strenggenommen immer nur für infinitesimale Größen. Genauer müssten wir also an sich schreiben: $dE = d\Phi/dA$. Bei Variation über den Raum muss man integrieren, also z.B. $E = \int dE$. Allerdings wird man in der industriellen Bildverarbeitung in der Regel die Größen als näherungsweise konstant annehmen, so dass man einfach die Differentiale weg lässt, also z.B. $E = \Phi/A$. Allerdings sollte man sich der dadurch entstehenden Näherung bewusst sein.

Die *Leuchtstärke* (*Lichtstärke*) I (I_e) ist der Lichtfluss (Strahlungsfluss) in einen Raumwinkelbereich, also $I = \Phi/\Omega$ (vgl. Abb. 7.1.2 rechts). Der Raumwinkel ist die Fläche einer Einheitskugel, die vom Strahlungsbündel durchstoßen wird:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = 4\pi \sin^2(\alpha/4) \approx \pi \sin^2 \alpha \quad (7.3)$$

Die *Leuchtdichte* (Strahldichte) schließlich ist der Lichtfluss (Strahlungsfluss) pro Raumwinkel und Fläche. Sie gibt letztlich die subjektiv wahrgenommene Helligkeit einer Licht emittierenden Fläche an. Bei zunehmender Entfernung des

⁴Wenn wir die Abstrahlung pro Flächeneinheit verwenden, dann muss man bedenken, dass die effektiv in eine Richtung ϕ wirksame bzw. sichtbare Fläche natürlich rein geometrisch noch mit $\cos \phi$ gewichtet werden muss (Projektion).

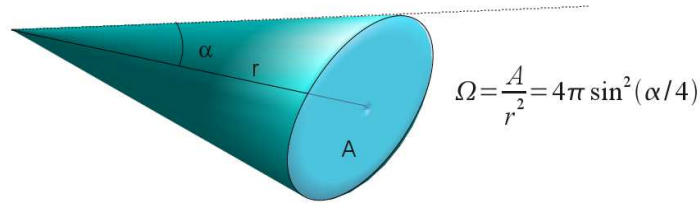


Abbildung 7.1.3: Raumwinkel geben eine Art räumlichen Winkel an. Spezifiziert wird dieser Winkel im Raum, indem man sich eine Kugel mit Radius 1 um den Quellpunkt denkt und den Flächenanteil, der von der Strahlungsverteilung diese Kugel durchstößt bestimmt. Dieser Flächenanteil ist gerade der Raumwinkel. Für den Vollraum ergibt sich somit als Raumwinkel die Kugeloberfläche, also 4π .

Auges von dieser Fläche nimmt der das Auge erreichende Lichtfluss zwar aufgrund der *Energieerhaltung (quadratisches Abstandsgesetzes)* ab, die Fläche des Bildes auf der Netzhaut nimmt aber ebenfalls quadratisch ab, so dass letztlich die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut konstant bleibt. Wenn uns also eine Fläche “hell” erscheint, dann bedeutet das, dass die Fläche in unseren Raumwinkelbereich viel Licht pro Flächeneinheit abstrahlt. Verkompliziert wird die Thematik auch dadurch, dass es einen “projizierten Raumwinkel” gibt, bei dem die Projektion mittels des Kosinus bereits einberechnet ist. Für kleine Winkel der Oberflächennormale zur Beobachtung entspricht der Raumwinkel dem projizierten Raumwinkel und der Kosinus ist 1. Vorsicht ist aber eben bei größeren Beobachtungswinkeln dahingehend gegeben, dass der Kosinus genau einmal (und nicht etwa doppelt) einberechnet wird.

Bei nicht senkrechter Betrachtung der Fläche muss für die Normierung auf die Fläche wieder die effektiv wirksame bzw. sichtbare Fläche verwendet werden (vgl. Fußnote zur Beleuchtungsstärke). Es ergibt sich also

$$L = \frac{I}{A \cos \phi} \quad (7.4)$$

Die Leuchtdichte (Strahldichte) bleibt beim Durchgang durch ein optisches System ohne Verluste konstant - unabhängig in welcher Ebene des Systems man die Dichte bestimmt.

Nun sind diese acht Größen zwar im Prinzip vergleichsweise einfach miteinander verbunden, aber die Vielfalt der Namen und Einheiten führt in aller Regel dann doch zur Verwirrung bzw. Unübersichtlichkeit. Abb. 7.1.4 zeigt übersichtlich nochmals den Zusammenhang und in der folgenden Tabelle sind nochmals alle wesentlichen Bezeichnungen aufgeführt. Zumindest kann man sich merken, dass

der hintere Teil des Namens für radiometrische und fotometrische Größen jeweils gleich sind. Der vordere Teil hat für fotometrische Größen immer mit “Licht” oder “leuchten” zu tun während er für radiometrische Größen eine Wortverwandschaft mit “Strahlung” aufweist.



Abbildung 7.1.4: Photometrische (radiometrische) Größen ergeben sich jeweils durch Angabe des Lichtfluss (bzw. der Leistung) pro Raumwinkel und/oder pro Fläche. Bild nach W.J. Cassarly, “Nonimaging Optics”.

Größe	Formel	Einheit	engl. Bez.
Lichtfluss, Lichtstrom Φ		lm	luminous flux
Strahlungsfluss, Leistung Φ_e		W	(radiant) flux, power
Beleuchtungsstärke E	$E = \Phi / A$	lx = lm/m ²	illuminance
Bestrahlungsstärke ⁵ E_e		W/m ²	irradiance
Lichtstärke I	$I = \Phi / \Omega$	cd	luminous intensity
Strahlstärke I_e		W/sr	radiant intensity
Leuchtdichte L	$L = I / (A \cos \phi)$	cd/m ²	luminance
Strahldichte L_e		W/sr/m ²	radiance

Wenn man die Bestrahlungsstärke oder Beleuchtungsstärke auf eine emittierende Fläche bezieht ist nach DIN 5031 der Begriff *spezifische (Licht-)Ausstrahlung* zu wählen.

Besondere Vorsicht ist beim Begriff “Intensität” gegeben. Dieser bedeutet im Deutschen in aller Regel eine Bestrahlungsstärke, also Leistung pro Flächeneinheit. Im angelsächsischen wird der Begriff innerhalb der Optik unterschiedlich gebraucht. Teilweise bezeichnet er auch dort eine Bestrahlungsstärke,

in der Fotometrie und Radiometrie ist er aber eine Strahlungsstärke, also die Leistung auf den Raumwinkel bezogen.

Nach [21] geben wir einige typische Werte für Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten an:

Direktes Sonnenlicht (am Mittag)	1000 W/m ²	100.000 lx	1.6 · 10 ⁹ cd/m ²
Bewölkter Himmel	100 W/m ²	10.000 lx	2000 cd/m ²
Vollmond	0.002 W/m ²	0.2 lx	2.500 cd/m ²
Mondlose Nacht 10 ⁻⁵ W/m ²	0.001 lx	0.001 cd/m ²	
Büro	5 W/m ²	300..500 lx	
Xenon Kurzbogenlampe			bis 5 · 10 ⁹ cd/m ²
100 W Glühbirne, matt			200 cd/m ²
LED-TV			500 cd/m ²
weißes Papier @ 500 lx			100 cd/m ²

Teilweise, insbesondere bei Beleuchtungssystemen, ist der Begriff der *Etendue* bzw. *Lichtleitwert* von Bedeutung. Die Etendue ist das Produkt aus Raumwinkel der Strahlung und (wirksamer) Fläche⁶, durch die die Strahlung propagiert. Dieser Lichtleitwert kann niemals (durch ein passives optisches System) gesteigert werden. Abnehmen kann der Lichtfluss zwar durchaus, aber das ist dann eine Folge von Verlusten. Man kann also durchaus die Bestrahlungsstärke ändern, z.B. indem man die Fläche verringert. Gleichzeitig vergrößert sich dadurch aber der Raumwinkel, um den Lichtleitwert konstant zu halten.⁷ Anschaulich kann man sich das am einfachsten anhand eine Keplerteleskops klar machen.

Um mit den Größen vertraut zu werden, sollten Sie einige (an sich sehr einfache) Übungsaufgaben durchspielen:

Beispiel: Die Beleuchtungsstärke auf dem Sensor beträgt $E=0.5$ lx. Sie benutzen rotes Licht bei einer Wellenlänge von 600 nm. Berechnen Sie die Bestrahlungsstärke. ($V(600 \text{ nm}) = 0.631$).

Lösung: Für monochromatisches Licht ergibt sich

$$\Phi(\lambda) = \frac{\text{lm}}{\text{W}} V(\lambda) \Phi_e \quad (7.5)$$

⁶also wieder die Fläche multipliziert $\cos \phi$

⁷In der geometrischen Optik ist diese Aussage praktisch gleichbedeutend mit der sogenannten Lagrangeinvarianten

und damit $\Phi_e = 0.5/683/0.631 = 1.1 \text{ mW/m}^2$.

Beispiel: Berechnen Sie die Beleuchtungsstärke auf Ihrem Bildsensor (2/3 Zoll) wenn ein Lichtfluss von 0.001 lumen auf den Sensor fällt.

Lösung: $E = 0.001/A$ mit $A = 8.8 \cdot 6.6 \text{ mm}^2$ ergibt $E = 17.2 \text{ lx}$.

Beispiel: Ihre Lichtquelle hat eine Leuchtstärke von 100 candela und beleuchtet ein Objekt im Abstand von 1 m. Die Leuchtstärke ist mehr oder weniger konstant über den Raumwinkelbereich. Berechnen Sie die Beleuchtungsstärke auf dem Objekt.

Lösung: Der Raumwinkel ist durch $\Omega = A/1^2 = A \text{ sr/m}^2$ gegeben. Mit $I = \Phi/\Omega$ erhalten wir $\Phi = I \cdot A$ und damit $E = \Phi/A = I \cdot \text{lx/cd} = 100 \text{ lx}$.

Beispiel: Die Strahldichte eines beleuchteten Objekts beträgt $50 \text{ W/(m}^2 \text{ sr)}$. Sie nehmen eine homogen verteilte Lichtaussendung an und die Fläche des Objekts beträgt $10 \times 10 \text{ mm}$. Berechnen Sie die Leistung, die das Objekt in Richtung der Eintrittspupille des Kameraobjektivs remittiert wenn die Kamera in einem Abstand von 1 m steht und einen Durchmesser der Eintrittspupille von 10 cm aufweist.

Lösung: Mit $\Omega = A/r^2 = \pi r^2/1^2 = 0.0079$ erhalten wir $\Phi = L \cdot 0.01^2 \cdot \Omega = 39 \mu\text{W}$

7.1.1 Bestrahlungsstärke auf dem Bildsensor

Für die Aufnahme von Bildern ist natürlich letztlich die Bestrahlungsstärke auf unserem Bildsensor die maßgebliche Größe, denn bei einer gegebenen Empfindlichkeit des Sensors kann damit dann berechnet werden, welche Grauwerte sich digital bei der Belichtung des Sensors ergeben.

Wir geben hier ohne Beweis die wesentliche Formel der Beleuchtungs bzw. Bestrahlungsstärke auf dem Sensor an, wenn ein Objekt der "Helligkeit" (genauer: Leuchtdichte bzw. Strahldichte) L von einem Abbildungssystem mit der nu-

merischen Apertur NA erfasst wird.

$$E = L \cdot NA'^2 \cos^4(\omega') \quad (7.6)$$

ω ist dabei der bildseitige Feldwinkel, also der Winkel des Hauptstrahls vom Zentrum der Austrittspupille zum jeweiligen Bildpunkt. NA' ist die bildseitige numerische Apertur, also der Sinus des halben Öffnungswinkels von der Austrittspupille zur Bildebene.

Der $\cos^4$ Anteil wird "natürliche" Vignettierung genannt und ist (normalerweise) bei allen Objektiven vorhanden⁸

Beispiel: Ein Objekt emittiert Licht (weil es beleuchtet wird) mit einer Strahldichte von $10 \text{ W/m}^2/\text{sr}$. Das Kameraobjektiv arbeitet bei Blende 5. Berechnen Sie die on-axis Bestrahlungsstärke auf dem CCD Sensor.

Lösung: $K=5$ entspricht einer numerischen Apertur von $\sin \alpha' = 1/(2K) = 0.1$. On-axis bedeutet, dass der Feldwinkel ω' Null ist. Daher gibt $E = \pi \cdot 10 \cdot 0.1^2 = 0.314 \text{ W/m}^2$.

Beispiel: Sie nutzen ein Objektiv mit einer Brennweite von 20 mm in Verbindung mit einem 1/3 Zoll Sensor (6 mm Diagonale). Wie stark ist die natürliche Vignettierung aufgrund des Objektivs? (Nehmen Sie an, dass der Objektabstand deutlich größer als die Brennweite ist.)

Lösung: Der maximale bildseitige Feldwinkel beträgt $\omega' = 3/20$ und daher $\omega' = 0.15 \text{ rad}$. Dadurch ergibt sich die natürliche Vignettierung zu $\cos^4 \omega' \approx 0.95$ was bedeutet, dass in den Ecken des Bildsensors die Bestrahlungsstärke um (mindestens) 5% reduziert sein wird.

⁸Wenn keine entsprechenden Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

7.2 Streuung und beleuchtete Flächen

Um die Bestrahlungsstärke auf dem Sensor zu berechnen ist es nach Gleichung 7.6 notwendig, die Strahldichte L_e bzw. Leuchtdichte L des beleuchteten Objekts zu kennen.

Wird das Objekt mit der Beleuchtungsstärke E beleuchtet, kann bei Lambertscher Streuung die Leuchtdichte nach

$$E = \pi L \quad (7.7)$$

berechnet werden.⁹

Lambertsche Streuung kann praktisch als mehr oder weniger “perfekte” Streuung einer Oberfläche angesehen werden. Einfallende Lichtteilchen werden unabhängig von ihrer Einfallrichtung auf die Oberfläche in eine beliebige Ausfallrichtung gestreut. Für die Leuchtstärke gilt:

$$I = I_0 \cos \phi \quad (7.8)$$

In der Praxis zeigen z.B. mattes Papier oder sandgestrahlte Oberflächen nahezu Lambertsche Streuung.

Die “Helligkeit” bzw. Leuchtdichte ist konstant, unabhängig davon aus welcher Richtung die Fläche betrachtet wird¹⁰

Beispiel: Sie bilden eine diffus streuende Oberfläche mit einer Fläche von 0.5 m² ab. Die Fläche wird mit 1 W/m² beleuchtet. 50% des Lichts wird absorbiert. Berechnen Sie die Strahlstärke in Richtung 20° zur Oberflächennormalen.

Lösung: $I = L \cdot A = E \cdot 0.5 / \pi \cdot 0.5 = 0.079 \text{ W/sr}$ on axis und multipliziert mit $\cos(20)$ ergibt sich $I(20^\circ) = 0.075 \text{ W/sr}$.

In der Praxis ergibt sich oft eine Mischform aus idealer Reflexion und idealer Streuung so dass man das Gesamtverhalten im einfachsten Fall eben durch einen gerichteten Anteil (Reflexion) und einen ideal ungerichteten Anteil (Streuung)

⁹Für eine Ableitung siehe z.B. [9].

¹⁰Unter schräger Betrachtung ist ein Flächenelement um den Faktor $\cos \phi$ verkleinert, so dass sich damit das $\cos \phi$ Gesetz erklärt (konstantes L bei Flächenverkleinerung führt dazu, dass auch I gemäß $L := I/A$ verkleinert sein muss).

beschreibt. Dies ist allerdings auch nur eine Näherung, da sich in der Realität eine Streukeule ergibt die mathematisch am besten durch die BRDF (vgl. nachfolgenden Abschnitt und Abschnitt 8.1.2) beschrieben wird.

Für eine gegebene Empfindlichkeit und Auflösung eines Bildsensors kann man für den sich oft ergebenden Fall eines bewegten Objekts (Fließband) den Zusammenhang zwischen notwendiger Beleuchtung und Geometrie der Aufgabenstellung in eine Formel packen.

Man startet zunächst mit dem Abbildungsmaßstab, der sich aus der Feldhöhe, der Pixelgröße ps und der Anzahl Pixel N in eine Richtung berechnet:

$$\beta' = -\frac{ps \cdot N}{y_{max}}, \quad (7.9)$$

Um einen Vollausschlag einer 8-Bit Kamera der Sensitivität S (Angabe in Digital Numbers pro Pixel pro nJ) zu erzielen benötigt man bei der Belichtungszeit τ eine sensorseitige Bestrahlungsstärke von

$$E_{CCD} = \frac{255}{S \cdot \tau} \quad (7.10)$$

Wenn man die Sensitivität in nJ pro cm^2 angibt dann muss mit $10^{-9} \cdot 10000$ multipliziert werden und es ergibt sich

$$E'_{CCD} = \frac{255}{S \cdot \tau} \cdot 10^{-9} \cdot 10000 \quad (7.11)$$

Basierend auf einer geforderten Schärfentiefe δz kann man die Blendenzahl berechnen:

$$K = \beta'^2 \frac{\delta z}{2ps} \quad (7.12)$$

Außerdem ist die Brennweite des Abbildungsobjektivs durch den Abbildungsmaßstab und den geforderten Arbeitsabstand a gegeben:

$$f = \beta' \cdot a \quad (7.13)$$

Dadurch können wir den maximalen Feldwinkel berechnen:

$$\omega = \arctan \frac{y_{max}}{2a} \quad (7.14)$$

Wir lösen

$$E_{CCD} = \pi L N A^2 \cos^4 \omega' \quad (7.15)$$

nach L auf und nutzen für die Lambertsche Oberfläche

$$E_o = \pi L \quad (7.16)$$

$$E_{obj} = \frac{\pi}{80.000} \frac{(a^2 + y_{max}^2) \cdot N^4 \cdot ps^2 \cdot \delta z^2}{a^4 S \cdot y_{max}^4 \cdot t} \quad (7.17)$$

Beispiel: Sie nutzen eine hochwertige Kamera (Dalsa Pantera) zur Abbildung eines Objekts (100 x 100 mm), das sich auf einem Fließband bewegt. Aufgrund der Bewegung sollte die Belichtungszeit kurz gewählt werden (1 ms). Sie nutzen 1000x 1000 Pixel mit einer Pixelgröße von 12 x 12 μm . Der Arbeitsabstand beträgt 1 m. Aufgrund des Fließbands (Wackeln) muss die Schärfentiefe mindestens 5 mm betragen. Berechnen Sie die notwendige Bestrahlungsstärke auf dem (streuenden) Objekt.

Lösung:

$$E_e = \frac{\pi}{80000} \frac{(1^2 + 0.1^2) 1000^4 \cdot (12 \cdot 10^{-6})^2 0.005^2}{1^4 \cdot 20 \cdot 0.1^4 \cdot 0.001} = 0.071 \text{ W/m}^2 \quad (7.18)$$

7.3 Wechselwirkung des Lichts mit dem Objekt

Licht, das auf Atome oder Moleküle fällt, regt die Elektronen der Atome auf höhere Energieniveaus an. Nach einer gewissen — in der Regel extrem kurzen — Zeit wird die Anregungsenergie wieder abgegeben. Dies kann in der Form von Wärme erfolgen. In diesem Fall wird also Lichtenergie in Wärmeenergie umgesetzt, man spricht von “Absorption”.

Wenn dagegen die Anregungsenergie wieder direkt in Lichtenergie umgewandelt wird, dann ergibt sich Streuung, Reflexion oder Transmission des Lichts.¹¹

Fällt Licht auf eine Oberfläche, dann wird in der Regel also ein Teil des Lichts absorbiert, ein Teil wird transmittiert bzw. dringt in das Material ein und ein Teil wird von der Oberfläche wieder ausgesendet.

¹¹Bei einer teilweisen Umsetzung in Wärme spricht man Fluoreszenz oder Phosphoreszenz. Kurzwelliges Licht wird in langwelliges Licht umgesetzt.

Die modellhafte Beschreibung dieser Anteile durch die Modelle “Reflexion” oder “Streuung” sind Idealisierung der sehr komplexen Wechselwirkung der Lichtteilchen mit den Atomen der Oberfläche. Dennoch sind diese Modelle sehr nützlich, um phänomenologisch das Verhalten des Lichts an den Oberflächen zu beschreiben.

Abb. ?? verdeutlicht die Zusammenhänge. An einer optisch glatten Oberfläche, d.h. einer Oberfläche deren Rauheit deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts ist, wird das Licht komplett reflektiert und gebrochen. Streuung findet nicht statt, d.h. die Richtung des Lichts nach der Oberfläche ist eindeutig durch das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz gegeben. Sobald die Oberfläche eine gewisse Rauheit aufweist, ergibt sich zusätzlich ein gestreuter Lichtanteil, d.h. zufällige, nicht vorhersehbare Lichtrichtungen treten zusätzlich auf.

Natürlich muss aus Gründen der Energieerhaltung die Summe aus gestreutem, reflektiertem und transmittierter Energie gleich der Energie des einfallenden Lichts sein.

Die winkelabhängige Lichtverteilung nach der Interaktion mit der Oberfläche wird über die Bidirektionale Reflektanz (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)¹² beschrieben. Für optisch glatte Oberflächen bei dielektrischen Medien (z.B. Glas) kann die Stärke der beiden Lichtanteile (Reflexion und Brechung) direkt durch die “Fresnelgleichungen” berechnet werden. Für raue Oberflächen sind verschiedene Modelle zur Berechnung der BRDF gebräuchlich. Das Verhältnis aus gestreutem zum gesamten reiterten Licht kann näherungsweise durch

$$\frac{R_{scatter}}{R_{total}} = 1 - \exp\left(-\left(4\pi \cos \phi_{in} \cdot \frac{\sigma_{RMS}}{\lambda}\right)^2\right) \quad (7.19)$$

beschrieben. Dabei bezeichnet ϕ_{in} den Einfallswinkel auf die Oberfläche und σ_{RMS} gibt die RMS Rauheit der Oberfläche an.

Die Absorption der Oberfläche kann natürlich nicht im allgemeinen beschrieben werden sondern ist extrem vom Material abhängig. Dabei ist nicht nur das Grundmaterial selbst zu beachten sondern auch Schichten, die sich auf dem Material bilden. Typische Beispiele sind Oxidschichten, die sich durch Reaktion mit der Umgebungsluft ergeben. Einige typische Werte für verschiedene Materialien finden sich in [22] Kap. 3.

¹²Alternativ: BSDF, bidirectional scatter distribution function

7.4 Spektralbereiche und Farbe

Weite Bereiche des elektromagnetischen Spektrum können für Bildgebungen genutzt werden. Die überwiegende Anzahl von Anwendungen findet sich im visuellen Spektralbereich, also zwischen ca. 400 und 700 nm¹³. Leistungsfähige Detektoren sind in diesem Spektralbereich kostengünstig mit hohen Pixelzahlen verfügbar und wir können eben direkt, das was wir sehen, mit dem in Verbindung bringen, was eine Kamera “sieht”.

Aber auch andere Spektralbereiche lassen sich nutzen. Von zentraler Bedeutung für viele Anwendungen ist dabei das nahe Infrarot (NIR-A: 780 bis 1400 nm und NIR-B: 1400 - 3000 nm).

Mittleres Infrarotlicht (ca. 3000 - 50.000 nm) kann natürlich zur Visualisierung von Temperaturen genutzt werden

Ultraviolettes Licht (100 - 380 nm) wird vor allem zur Fluoreszenzanregung genutzt. Organische Moleküle (z.B. Öle, Fingerabdrücke) fluoreszieren unter ultravioletter Bestrahlung und können so sichtbar gemacht werden.

Für die Mehrzahl der Anwendungen in der industriellen Bildverarbeitung wird jeweils nur ein Spektralbereiche betrachtet, d.h. es werden nicht unterschiedlich Spektralbereiche unterschiedlich detektiert bzw. prozessiert. Oder in einfachen Worten: Meist wird “die Farbe” nicht beachtet denn bei vielen Objekten (vor allem Metallteile) ist in der Farbe praktisch keine relevante Information kodiert.

Mit dem zunehmenden Trend, Consumersensoren und Consumeroptiken industriell einzusetzen und der Möglichkeit, auch die gestiegene Informationsmenge von Farbsensoren in kurzer Zeit auszuwerten, wird allerdings auch der Anteil an Farblösungen in Zukunft vermutlich weiter deutlich zunehmen.

Generell ist die Vorgehensweise bei der Farbbildaufnahme eine einfache Erweiterung der monochromatischen Aufnahme auf mehrere Kanäle. Die Abbildungsoptik wird so ausgelegt, dass alle relevanten Spektralbereiche in ausreichender Bildqualität übertragen werden und der Bildsensor nutzt eine wie auch immer geartete spektrale Diskriminierung. Grundsätzlich stehen dabei folgende Varianten zur Auswahl:

¹³Nach der DIN Norm 5013 genauer: 380 bis 780 nm

Farbmasken: Vor den eigentlichen lichtempfindlichen Pixeln werden Farbmasken (meist mit drei unterschiedlichen Spektralkanälen) verwendet, vgl. Abb. 5.10.22.

Zeitliches Multiplexing: Es wird entweder ein zeitlich wechselnder Filter vor dem Objektiv der Kamera verwendet oder aber die Szene wird zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlichen Spektren beleuchtet (meist getaktete LED Quellen). Zeitsequentiell werden somit Bilder mit unterschiedlicher spektraler Information aufgenommen. Natürlich macht das nur Sinn, wenn sich die Szene während den unterschiedlichen Aufnahmen nicht ändert.

Mehrere Kameras/Bildsensoren: Es werden verschiedene Bildsensoren so in einer Kamera kombiniert (sogenannte “3-Chip Kameras”), dass das spektral aufgespaltene Licht auf die Sensoren (in der Regel: drei) fällt. Dadurch ergibt sich für jeden Spektralkanal direkt ein eigenständiges Bild.

Dispersive Aufspaltung: Bei abtastender Bildaufnahme kann durch ein dispersives Element im Abbildungsstrahlengang eine eindimensionale Bildinformation auf ein zweidimensionales Signal transformiert werden. Die zweite Dimension dient somit zur Erfassung des Spektrum. Es werden also nicht nur wenige Spektralkanäle sondern sehr viele (z.B. 50 ... 100) Spektralbänder gleichzeitig erfasst. Man spricht von *Hyperspektralkameras*. Natürlich wird dies letztlich durch Einschränkung der räumlichen oder zeitlichen Auflösung erreicht.

Für jeden Kanal gilt aber, dass die Antwort des photosensitiven Elements (z.B. ein Pixel) wieder durch die spektrale Verteilung des Objektpunkts gewichtet mit der spektralen Empfindlichkeit des Spektralelements berechnet wird. D.h. es wird ganz analog zu Gleichung 7.1 wieder das Signal berechnet. Lediglich die spektrale Empfindlichkeit ist dann eben für jeden Kanal anders zu wählen.

Auch für eine monochromatische Anwendung ist die spektrale Empfindlichkeit des Bildsensors natürlich zu beachten. Ganz analog dem menschlichen Sehsystem hat jede Kamera ihre eigene spektrale Empfindlichkeitsfunktion $V'(\lambda)$ (siehe Gl. 7.1) die beachtet werden muss, wenn man die Antwort auf eine bestimmte Lichtverteilung berechnen will. Natürlich wählt man wenn die Lichteffizienz problematisch ist am besten eine Kombination aus Beleuchtung und Bildsensor, die spektral zusammen passt.

Kapitel 8

Beleuchtung

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Welche verschiedenen Lichtquellen und Bauformen von Lichtquellen in der Bildverarbeitung eingesetzt werden.
- Wann Sie welche Beleuchtungsgeometrie verwenden.
- Welche Parameter bei der Beurteilung einer Beleuchtung relevant sind.
- Welche Vor- und Nachteile unterschiedliche Lichtquellen aufweisen.
- Was bei der Wahl der Wellenlänge zu beachten ist.
- Wie man Fremdlichtanteile unterdrücken kann.
- Wie man Fluoreszenz und Polarisation einsetzen kann, um die Bildgebung zu verbessern.

Industrielle Bildverarbeitung ist mehr als Abbildungsoptik, Kamera und Software. Von zentraler Bedeutung, aber oftmals unterschätzt ist die Beleuchtung. Eine gut gewählte Beleuchtung ist für viele Aufgaben essentiell, um eine Bildverarbeitungsanwendung erfolgreich zu implementieren. Generell gilt, dass die Beleuchtung so gewählt werden sollte, dass die interessierenden Merkmal “gut” (in der Regel mit hohem Kontrast) im Bild erscheinen während gleichzeitig die

nicht-interessierenden Merkmal möglichst wenig sichtbar sein sollten. Die Geometrie der Beleuchtung spielt hierfür eine zentrale Rolle. Aber auch die Wahl der Wellenlänge kann entscheidend sein.

Darüber hinaus ist durch geeignete Wahl der Beleuchtung dafür zu sorgen, dass genügend Licht auf den Bildsensor fällt und der Anteil an Störlicht (z.B. Umgebungslicht) vernachlässigbar ist.

Für die Auslegung der Beleuchtung ist zunächst ein Verständnis der Lichttechnik von zentraler Bedeutung auch wenn dies in der industriellen Praxis aktuell meist nicht umgesetzt wird. Eine sinnvolle Wahl der Beleuchtung entscheidet letztlich sehr stark über die Kosten eines BV-Systems und über den Schwierigkeitsgrad der softwaretechnischen Umsetzung.

Letztlich muss es das Ziel sein, die optische Leistung der Lichtquelle möglichst effizient zu nutzen. Eine erhöhte Leistung der Lichtquelle führt zu höheren Kosten oder einer beschleunigten Alterung und ganz generell zu Problemen.

Neben der sinnvollen Wahl der eigentlichen Lichtquelle sind natürlich die Beleuchtungsoptik aber auch verschiedene Techniken (z.B. eine Pulsung zur Fremdlichunterdrückung) wesentlich zur Auslegung des Beleuchtungssystems.

8.1 Beleuchtungsgeometrien und Beleuchtungsoptik

Es ist nicht im geringsten ausreichend, die Beleuchtungsquelle für die Beleuchtung zu wählen. Absolut entscheidend sind sowohl die Geometrie der Gesamtanordnung des BV-Systems (inklusive Objekt) als auch die Optik, die für die Beleuchtung verwendet wird.

Es sei nochmals daran erinnert, dass es die zentrale Aufgabe des Beleuchtungssystems ist, für relevante Merkmale einen möglichst hohen abbildungsseitigen Kontrast zu generieren während irrelevante Merkmale möglichst kontrastarm abgebildet werden sollten.

Abbildung 8.1.1 verdeutlicht dies anhand einer sehr oft eingesetzten Beleuchtungsmethodik, der sogenannten Dunkelfeldbeleuchtung. Das Beleuchtungslicht wird bei einer ebenen, fehlerfreien Oberfläche weg von der Kamera gestreut bzw. reflektiert. Lediglich an lokalen Defekten (z.B. Kratzer) ergibt sich Streuung in

Richtung der Kamera. Die Defekte werden daher als helle Strukturen auf einem ansonsten dunklen Bild sehr gut sichtbar. Ein Beispiel für die Hervorhebung von Kanten zeigt Abb. 8.1.2.

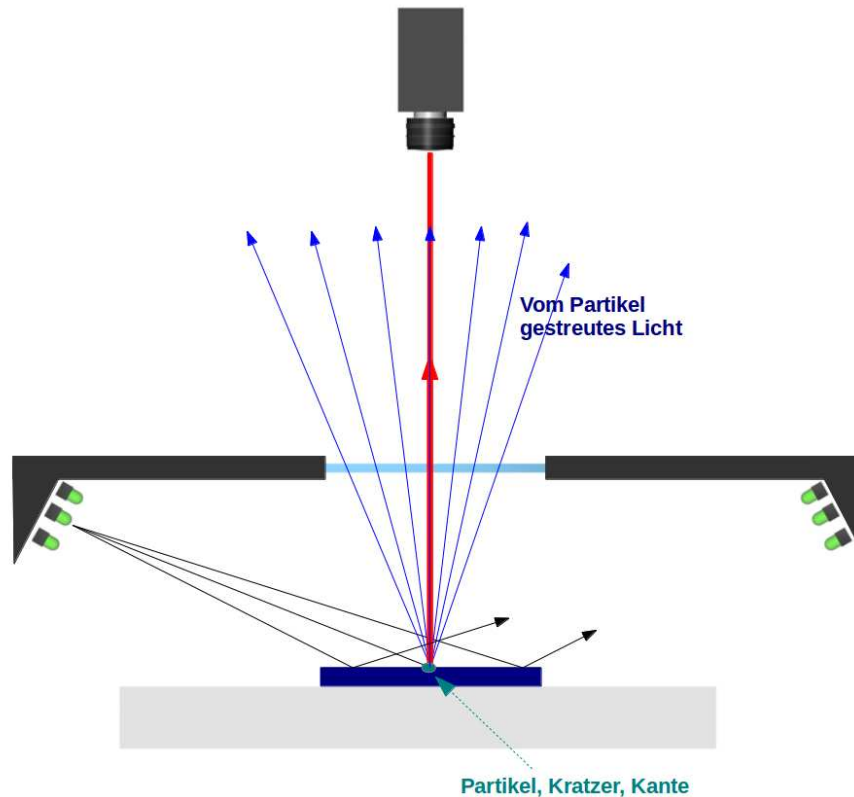


Abbildung 8.1.1: Dunkelfeldbeleuchtung mittels Ringlicht. An der ebenen Oberfläche reflektiertes Licht tritt nicht in die Eintrittspupille der Abbildung ein. Daher ergibt sich an den entsprechenden Stellen ein dunkles Bild. Defekte und Kanten führen zur Streuung und ein Teil des Beleuchtungslichts findet so den Weg in das Kameraobjektiv bis zu Bildebene.



(a) diffuse Beleuchtung

(b) näherungsweise Dunkelfeldbeleuchtung durch tiefes Ringlicht

Abbildung 8.1.2: Beleuchtung einer Dose mit einem Ringlicht

Selbst diese an sich klare und einfache Geometrie ist in der Praxis nicht immer unproblematisch. Welcher Winkel bzw. welche Winkelverteilung ist ideal, wie wirken sich Fehler in der Positionierung des Objekts aus und was passiert bei komplexeren Objektgeometrien? Vor allem hängt die Streuung an der lokalen Struktur massiv von den Details der Struktur ab. In der Praxis muss man daher meist experimentell vorgehen und unter sehr verschiedenen Richtungen beleuchten und die sich ergebenden Bilder analysieren. Ideal hierzu ist z.B. eine Schwanenhalsleuchte. Basierend auf den Ergebnissen zeigt sich dann, welche Gesamtbeleuchtungsgeometrie günstig ist.

Nach diesem Beispiel der Dunkelfeldbeleuchtung wollen wir etwas allgemeiner werden. Grundsätzlich ist zwischen einer Beleuchtung in Auflicht und (seltener) in Durchlicht zu unterscheiden.

8.1.1 Durchlicht

Durchlichtbeleuchtungen sind sehr gut geeignet, die (Außen-)Konturen im Sinne einer Geometrieprüfung zu untersuchen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass an den Kanten bei einfachen Beleuchtungssystemen Reflexionen auftreten können, die unter Umständen das Ergebnis der Messung deutlich verfälschen.

Hinsichtlich der Vermeidung solcher Effekte sollte eine telezentrische Beleuchtungsoptik eingesetzt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass das Objekt nur von parallelem Licht beleuchtet wird (Abb. 8.1.3). In diesem Fall muss dann allerdings auch eine telezentrische Abbildungsoptik verwendet werden. Abbildungs- und Beleuchtungsoptik müssen exakt aufeinander justiert werden um Fehler zu vermeiden.

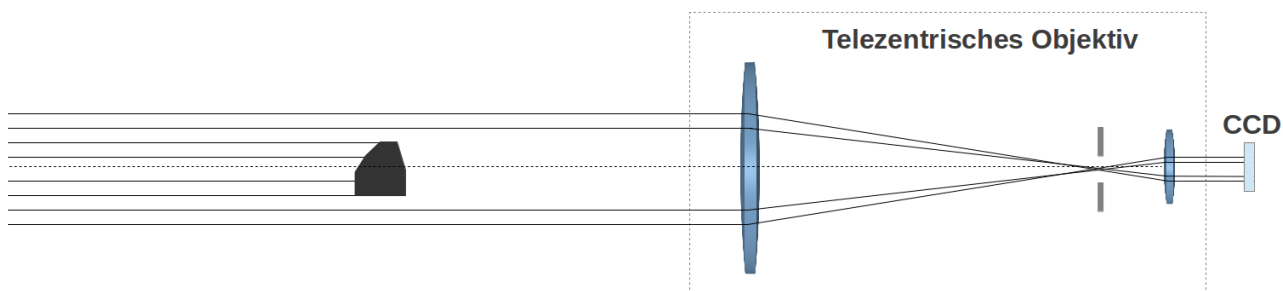


Abbildung 8.1.3: Telezentrische Durchlichtbeleuchtung mit telezentrischer Abbildungsoptik

Eine weitere wichtige Anwendung von Durchlichtbeleuchtungen sind (halb-)transparente Proben, wie sie sehr häufig in der biomedizinischen Mikroskopie auftreten. In diesem Fall ist die Durchlichtbeleuchtung der klassische Standard. Aber auch technische Objekte können von dieser Beleuchtung profitieren. Man unterscheidet in diesem Fall zwischen kritischer Beleuchtung, bei der die Quelle in die Objektebene abgebildet wird, und Köhlerscher Beleuchtung, bei der die Quelle in einer Fourierebene des Objekts liegt.

Wir wollen auf diese Beleuchtungen nicht weiter eingehen und verweisen z.B. auf [23] da die überwiegende Anzahl an Anwendungen der industriellen Bildverarbeitung ohne Zweifel in Auflicht erfolgt.

8.1.2 Auflicht

Grundsätzlich ist bei Beleuchtungen zwischen diffusem und gerichtetem Licht zu unterscheiden. Diffus bedeutet, dass ein Objektpunkt aus unterschiedlichen Richtungen beleuchtet wird. Je mehr Richtungen, desto diffuser die Beleuchtung (s. Abb. 8.1.4).

Eine ideal diffuse Beleuchtung ist ein komplett wolkenbedeckter Himmel, natürlich eine für die industrielle Bildverarbeitung nicht realistische Beleuchtungsquelle. Da das Licht idealerweise gleichzeitig aus allen Richtungen kommen soll benötigt man eine ausgedehnte Quelle. Sehr diffuses Licht erzielt man mit einer Dombeleuchtung (Abb. 8.1.4), allerdings ist, vor allem bei ausgedehnten Objekten, der Platzbedarf (und damit dann auch die Kosten) sehr hoch. In diesem Fall werden zunehmend sogenannte *Flatdome*s verwendet (s. Abb. ??) oder aber man verwendet mehrere Flächen-, Linien- oder Punktstrahler (unter Umständen in Verbindung mit einer diffus streuenden Fläche in Transmission oder Reflexion).

Man kann nicht generell sagen, welcher Grad der Diffusion für eine bestimmte Erfassung von Merkmalen am besten geeignet ist. Glanzlichter und damit Überstrahlungen werden aber in jedem Fall vermieden. Dadurch wird oft die Auswertung vereinfacht, insbesondere, wenn der Reflexionsanteil einer Oberfläche hoch ist und leichte Verformungen der Oberfläche erlaubt sind.

Abb. 8.1.7 zeigt ein typisches Beispiel der Verbesserung, die durch eine diffuse Dombeleuchtung erzielt werden kann. Zur Kontrolle der Geometrie der Dose ist das diffuse Bild deutlich besser geeignet, denn die Reflexe im Bild mit teilweise

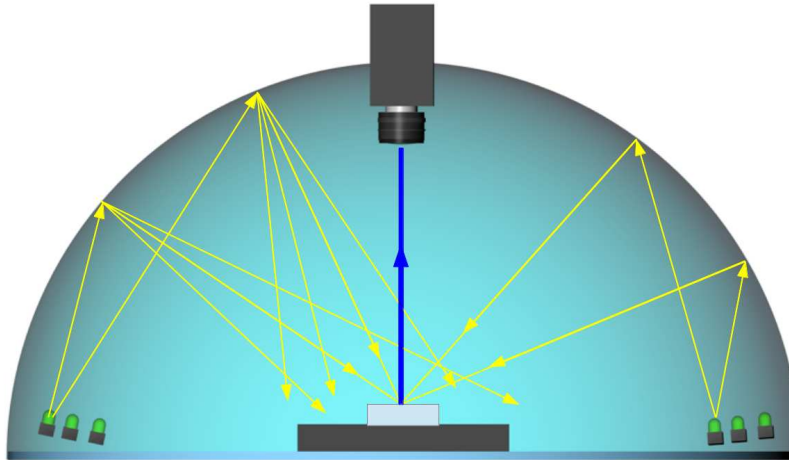


Abbildung 8.1.4: Diffuse Beleuchtungsgeometrie in Aufsicht mit einer Dombeleuchtung. Bei der diffusen Beleuchtung trifft Licht aus allen möglichen Richtungen auf jede Stelle des Objekts. Bei der (total) gerichteten Beleuchtung ergibt sich an jeder Position nur eine Beleuchtungsrichtung. Oft wird ein Dom mit streuender Oberfläche verwendet, um eine möglichst ideale diffuse Beleuchtung zu realisieren.

gerichteter Beleuchtung erschweren die Auswertung, insbesondere da die Position und Stärke der Reflexionsanteile mit leichten Formänderungen variiert.

Ringbeleuchtungen sind weniger stark gerichtet als einzelne Spotstrahler denn zumindest fallen unterschiedliche radiale Richtungen auf das Objekt. Dennoch sind sie ohne zusätzliche Diffusoren teilgerichtet. Selbst mit zusätzlicher Diffusorschicht (wie in Abb. 8.1.6 verwendet) ist der gerichtete Anteil stark, so dass deutliche Reflexionsstörungen auftreten können.

Natürlich kann die nicht-diffuse auch Vorteile ergeben. Nämlich dann, wenn gerade (geänderte) Reflexionen und Streuungen sichtbar gemacht werden sollen. Abb. 8.1.8 zeigt ein Beispiel eines Rohres mit einer deutlicheren und einer sehr minimalen Eindellung. Unter diffuser Beleuchtung ist die Eindellung nicht sichtbar, unter gerichteter Beleuchtung aber verhältnismäßig gut.

Die Abbildung zeigt sehr gut, dass selbst bei passender Beleuchtung (hier: gerichtet) eine Auswertung durchaus anspruchsvoll werden kann wenn die Oberfläche eines korrekten Bauteils gewollte Variationen aufweist (hier kleiner Eindellungen). Andererseits zeigt das Beispiel abermals, dass bei falsch gewählter Beleuchtung (hier: diffus) überhaupt keine Chance besteht, eine stabile Auswertung zu realisieren. Eine oberflächige Betrachtung von Abb. 8.1.8 (b) würde zu dem Schluss führen, dass ein dreidimensionales Messverfahren zur Detektion entsprechender Dellen eingesetzt werden muss.

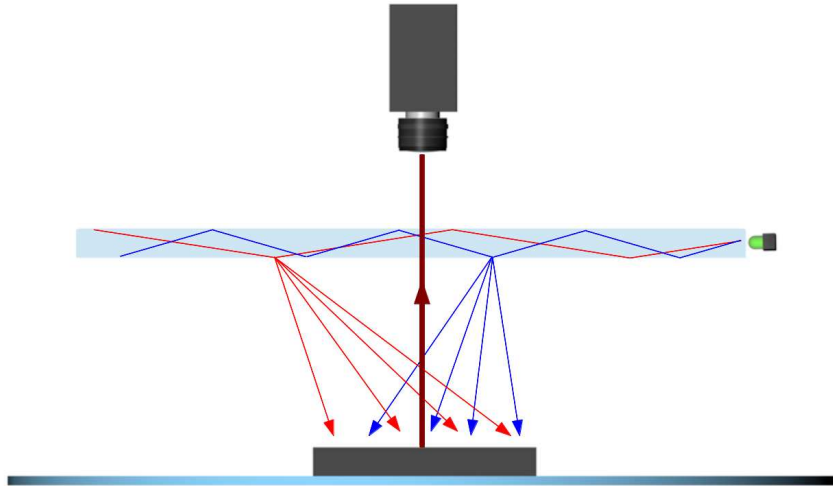
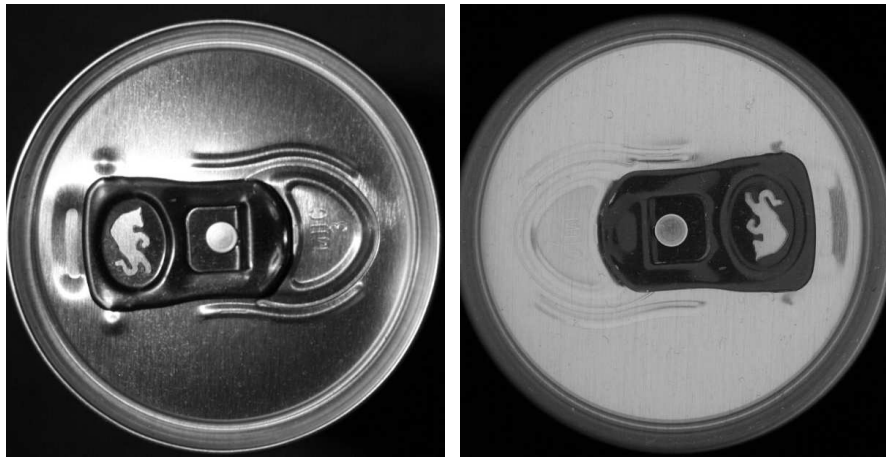


Abbildung 8.1.5: Flatdom Beleuchtung. Seitlich eingekoppeltes Licht wird fortlaufend an der Lichtleiterplatte reflektiert. Kleine Unregelmäßigkeiten der Platte sorgen dafür, dass ein Teil des Lichts nicht reflektiert sondern gestreut wird und so das Objekt unter verschiedenen Winkeln erreicht. Durch die Wahl der Höhe des Flatdomes kann das Winkelspektrum des Beleuchtungslichts variiert werden. Die Kamera inspiziert die Oberfläche durch ein Loch in der Lichtleiterplatte.

Für die Hervorhebung von Details in bestimmten Orientierungen ist natürlich die Beleuchtungsrichtung wesentlich. Abb. 8.1.9 zeigt als Beispiel eine Aufnahmeplatte mit angerissenen Positionen. Diese werden in gerichteter Beleuchtung dann besonders gut sichtbar, wenn die Beleuchtungsrichtung senkrecht zur Orientierung der Struktur gewählt wird. Die teilgerichtete Beleuchtung mit einem (tiefen) Ringlicht führt in diesem Fall ebenfalls zu einer guten Sichtbarkeit der Linien.

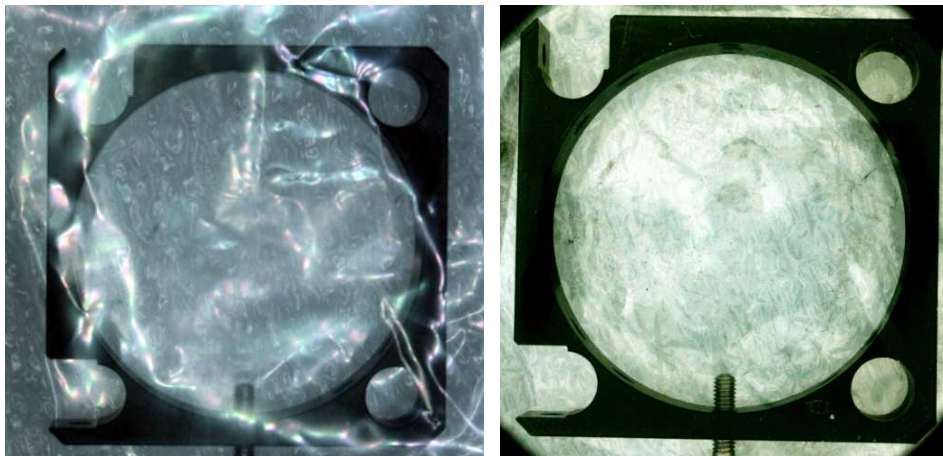
Idealerweise würde eine diffuse Beleuchtung eher verhindern, dass diese Linien überhaupt sichtbar werden (je nach Aufgabenstellung kann das schlecht oder gut sein). Es zeigt sich deutlich, dass dies hier nicht der Fall ist. Die Wechselwirkung von Licht mit Kratzern ist sehr komplex und für die sich ergebenden Helligkeitsunterschiede im Bild sind neben dem Kratzer selbst auch die Rauheit der Umgebung und die Kameraöffnung entscheidend. Es ist also oftmals schwierig, sicher vorherzusagen, welchen Effekt eine bestimmte Beleuchtung im Bild letztlich ergibt. Selbst eine Simulation der entsprechenden Lichtwechselwirkung mit der Mikrostrukturwechsel ist nur eingeschränkt möglich. Entscheidend ist also beim Stand der Technik, dass eine Mischung aus heuristischem und experimentellem Vorgehen notwendig ist, um die Beleuchtungsgeometrie passend zu wählen.



(a) gerichtete Beleuchtung

(b) Diffuse Dombeleuchtung

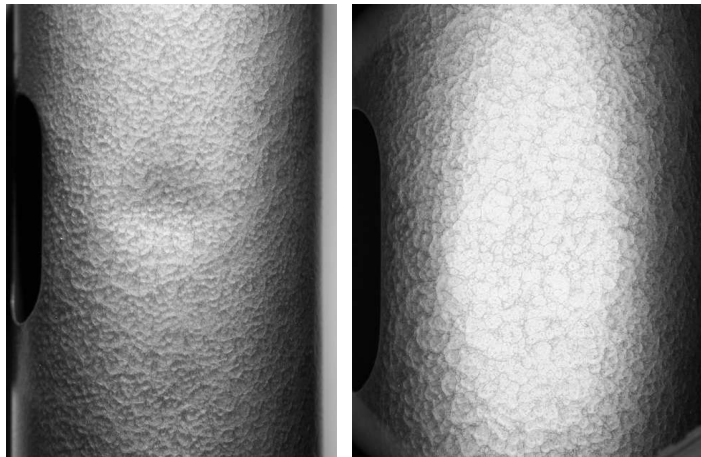
Abbildung 8.1.6: Diffuse Beleuchtung vermeidet bzw. reduziert Glanzlichter und kann daher insbesondere bei Oberflächen mit ausgeprägten Reflexionsanteilen das Bildergebnis deutlich verbessern.



(a) Ring-Beleuchtung (teilgerichtet)

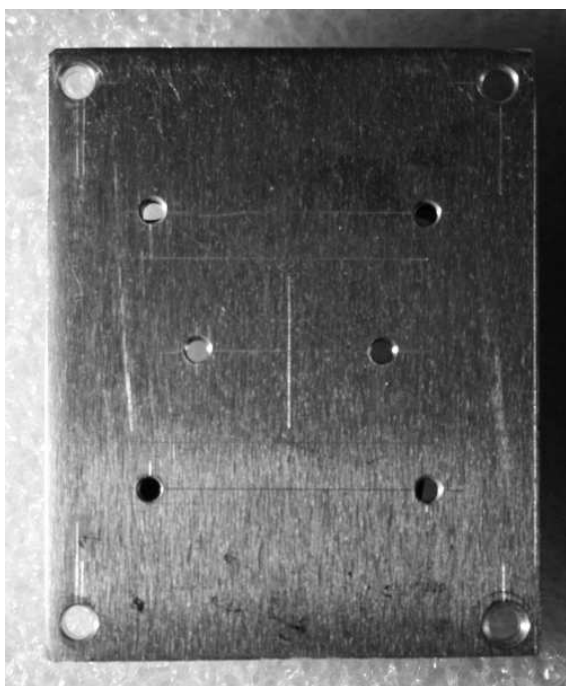
(b) Diffuse Dombeleuchtung

Abbildung 8.1.7: Bauteil in verpacktem Zustand (Klarsichtfolie). Die gerichtete Beleuchtung durch ein Ringlicht führt in (a) zu einem deutlichen Störlichtanteil in Form von Reflexionen, die eine automatisierte Auswertung unnötig erschweren. Die diffuse Dombeleuchtung vermeidet den Nachteil.

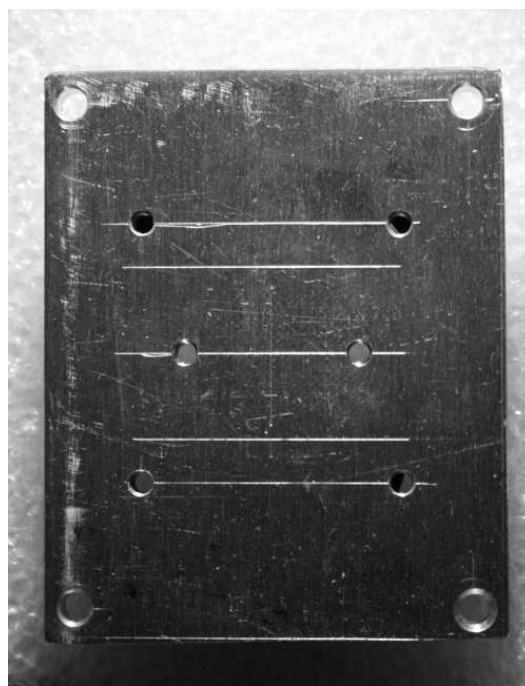


(a) gerichtete Beleuchtung (b) Diffuse Dombeleuchtung

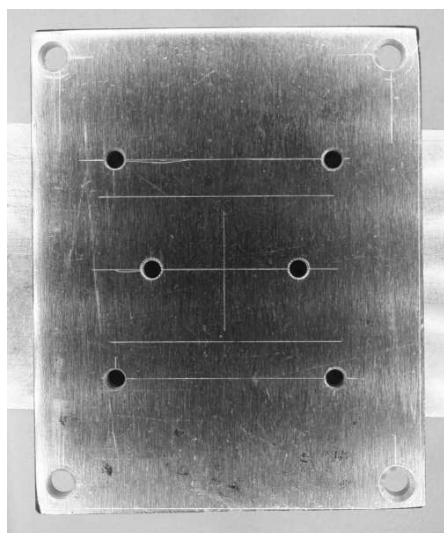
Abbildung 8.1.8: Leichte Eindellungen einer Oberfläche mit Teilreflexionsanteil können unter gerichteter Beleuchtung sichtbar gemacht werden und verschwinden bei diffuser Beleuchtung.



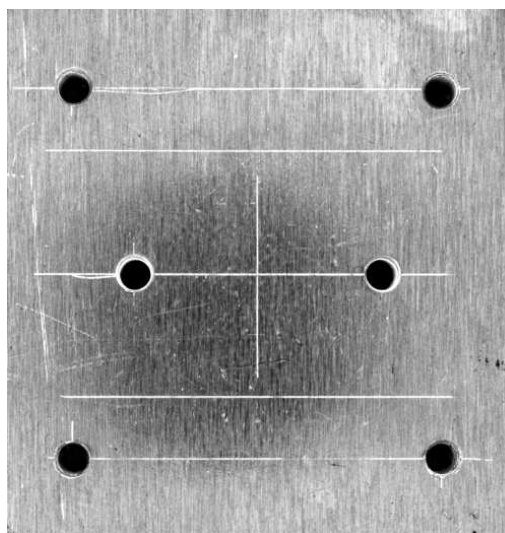
(a) gerichtete Beleuchtung von links



(b) gerichtete Beleuchtung von unten



(c) Teilgerichtete Beleuchtung mit Ringlicht



(d) Dombeleuchtung

Abbildung 8.1.9: Anrisse auf einer Aluminiumoberfläche bei unterschiedlicher Beleuchtung.

Generell gilt, dass eine gerichtete Beleuchtung auch zu vom Objekt kommenden gerichtetem Licht führt wenn das Objekt nicht sehr diffus streuend ist. Die Lichtrichtung hängt dabei natürlich aufgrund des Reflexionsgesetzes von der lokalen Oberflächenneigung des Objekts ab. Dabei ist nicht nur die makroskopische Topografie sondern auch die Mikrotopografie entscheidend. Die Mikrotopografie führt zu einer "Streuung" an der Oberfläche. Aus einer definierten Richtung einfallendes Licht wird so in verschiedene Richtungen abgelenkt bzw. gestreut. Welcher Anteil des Lichts im statistischen Mittel in welche Richtung streut wird durch die sogenannte Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) spezifiziert. Diese ist vom Material und der Oberflächenstruktur aber auch vom Einfallswinkel abhängig (s. Abb. 8.1.2). Letztlich gibt die BRDF somit an, welche Strahldichte im Verhältnis zur einfallenden Bestrahlungsstärke sich winkelabhängig ergibt. Verschiedene Modelle sind verfügbar, um die BRDF näherungsweise zu berechnen. In der Praxis wird aber oft nur eine grobe Unterteilung in einen gerichteten und einen komplett diffusen Anteil unterteilt.

Bei Objekten mit einem stark gerichteten Reflexionsanteil und gerichteter Beleuchtung kann es je nach Geometrie von Objekt, Beleuchtung und Abbildung zu einzelnen Reflexen im Bild kommen. An diesen Stellen wird der Bildsensor meist komplett überstrahlt und in der Regel wird man die Reflexe vermeiden wollen. In diesem Fall ist eine (mehr oder weniger ausgeprägte) diffuse Beleuchtung vorteilhaft.

Andererseits kann die gerichtete Beleuchtung bei solchen Objekten sehr gut eingesetzt werden, um Abweichungen von ansonsten ebenen Objekten zu finden. Das klassische Beispiel ist die bereits in der Einleitung dieses Abschnitts eingeführte *Dunkelfeldbeleuchtung*. Da die Orientierung der Defekte meist zufällig ist, erfolgt die schräge Beleuchtung in der Regel von allen Richtungen und wird dann mit einem "Ringlicht" realisiert (s. Abb. 8.1.10). Der Einfallswinkel wird über die axiale Position des Ringlichts variiert. Je größer das zu inspizierende Objekt ist, desto aufwändiger ist ein solcher Ringlichtansatz.

Durch Variation des Ringlichtabstandes von dem abzubildenden Objekt kann das Bild deutlich variiert werden. Der Dunkelfeldcharakter geht mehr und mehr verloren (Abb. 8.1.10 und 8.1.11).

Oft einfacher ist der Einsatz von einzelnen, linearen Beleuchtungsmodulen, sogenannten *Linienlichtern*. Das Verhalten ist dann natürlich nicht mehr isotrop, d.h. je

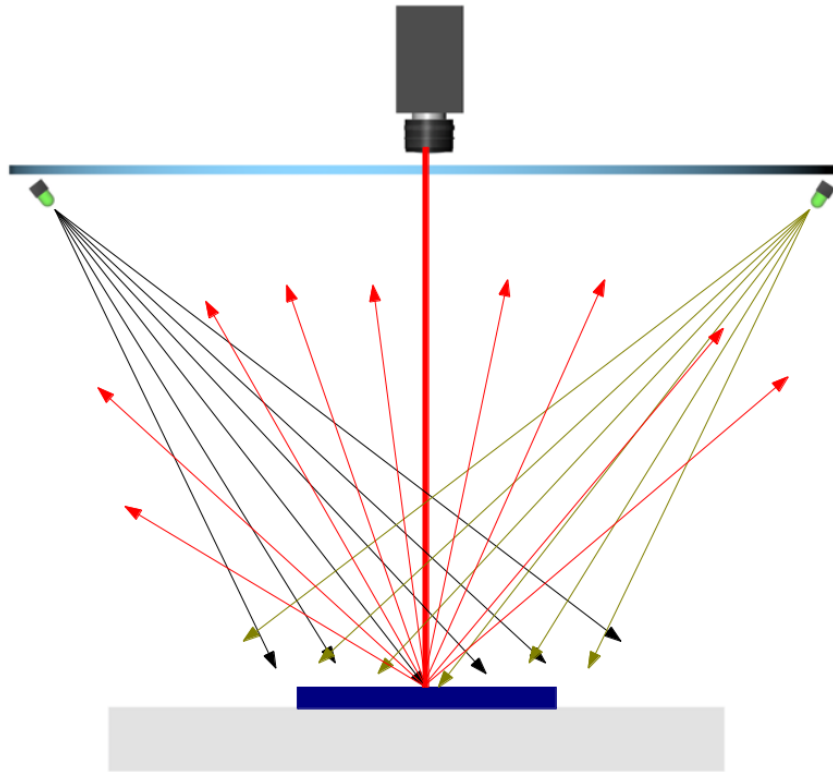


Abbildung 8.1.10: Beleuchtung mittels Ringlicht bei mittlerer Höhe. Der Dunkelfeldcharakter geht beinahe verloren. Geringe Streuungen führen aber zu Aufhellungen im Bild.

nach Orientierung werden Strukturen unterschiedlich auf der Kamera dargestellt. Teilweise kann das aber auch ein Vorteil sein (z.B. Unterdrückung von Bearbeitungsriefenstrukturen).

Viele verschiedene Auflichtquellen mit einer teilweise gerichteten Abstrahlung sind verfügbar und bilden einen Kompromiss aus komplett gerichteter und komplett diffuser Beleuchtung.

Einen Sonderfall stellen mehr oder weniger ausgedehnte Linienbeleuchtungen dar. Sie werden in Kombination mit Zeilenkameras eingesetzt. Sehr feine Linien werden für die strukturierte Beleuchtung in der 3D-Messtechnik verwendet.

Hohe Strahlungsleistungen lassen sich auch unter beengten Platzverhältnissen über Lichtleiter zum Objekt bringen.



(a) Ringlicht in falscher Höhe: starke Störreflexe aufgrund der einzelnen Ringlicht-LEDs
(b) sinnvolle Höhe: die Reflexionen sind reduziert und liegen in wenig störenden Bereichen

Abbildung 8.1.11: Beleuchtung einer Dose mit einem Ringlicht

8.2 Linienbeleuchtung

Insbesondere wenn Objekte mit konstanter Geschwindigkeit unter einem Inspektionssystem bewegt werden und hohe Lichtleistungen notwendig sind, ist es sinnvoll, eine eindimensionale Bildaufnahme mit dementsprechend eindimensionaler Beleuchtung zu überdenken.

Die Bewegung des Objekts führt zwangsweise zu einer vergleichsweise kurzen Belichtungszeit τ , denn zu lange Belichtungen führen natürlich zu Bewegungsunschärfen. Mit einem konventionellen Flächensensor müssen also während der Belichtungszeit Millionen von Pixeln genug Licht bekommen. Dementsprechend muss sehr viel Energie in einen kurzen Beleuchtungspuls gepackt werden.

Bei einem eindimensionalen Sensor ist die effektive Bildaufnahmezeit deutlich verlängert denn bei z.B. 1000×1000 Pixeln im Gesamtbild ist die Gesamtaufnahmedauer dann 1000τ . Dementsprechend steht letztlich mehr Licht pro Bild zur Verfügung (s. Abb. 8.2.12).

Der Gewinn ist allerdings in der Praxis nicht ganz so extrem, denn die Beleuchtung kann nicht exakt nur eine Auflösungszelle der Abbildungsoptik ausleuchten¹. Außerdem muss bedacht werden, dass eine ungleichförmige Bewegung des Objekts natürlich zu Bildverzerrungen führt. Die Geschwindigkeit des Objekts

¹Abgesehen davon, dass bei leichter Höhenvariation des Objekts aufgrund des Triangulationswinkels zwischen Beleuchtung und Abbildung ein Versatz auftritt der ebenfalls ausgeleuchtet werden muss.

muss also sehr konstant sein.

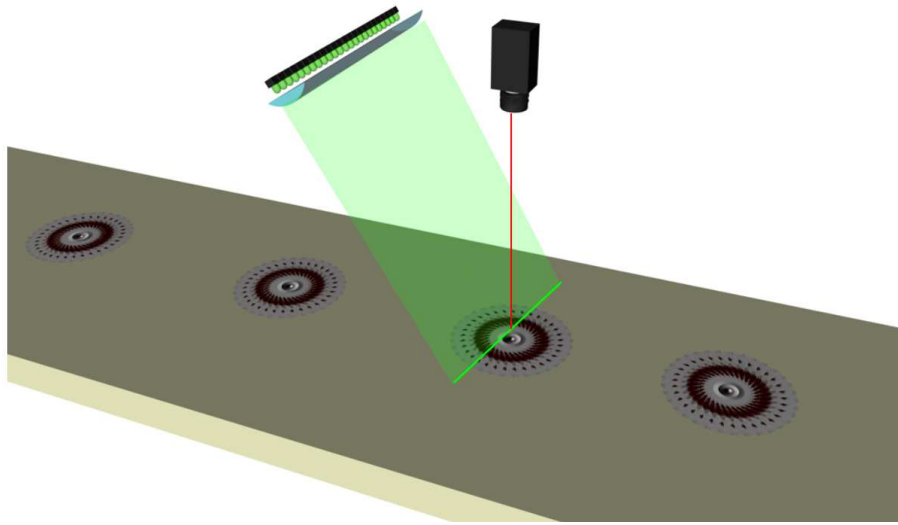


Abbildung 8.2.12: Bei Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit kann die effektive Belichtungszeit pro Gesamtbild deutlich gesteigert werden indem die Zeilen zeitsequentiell aufgenommen werden.

Eine Parallelisierung des Ansatzes ist möglich indem mehrere Zeilen parallel beleuchtet und aufgenommen werden.

8.3 Wahl der Wellenlänge

Unterschieden wird zunächst zwischen monochromatischen und polychromatischen Anwendungen. Hinsichtlich des Spektralbereichs unterscheidet man in

Ultraviolettes Licht: 100 - 380 nm (meist genutzt: 250 - 380 nm)

sichtbares Licht: 380 - 780 nm, (meist genutzt: 420 - 780 nm)

Nahinfrarot-A: 780 - 1400 nm, Beachte: Silizium-basierte Sensoren arbeiten aber nur bis ca. 1100 nm.

Short Wave Infrared SWIR: 1100 - 1800 nm (nicht in der der DIN enthalten)

Nahinfrarot-B: 1400 - 3000 nm

Mittleres Infrarot: 3000 - 50.000 nm

Fernes Infrarot: $> 50 - \mu\text{m}$.

Für Anwendung zur Beurteilung bzw. Überprüfung von Farben ist ein möglichst kontinuierliches Spektrum sinnvoll. Typischerweise werden also thermische Quellen (meist Halogen) eingesetzt. Teilweise werden auch spezielle Kombinationen verschiedener LEDs verwendet. Spezifiziert wird die Qualität zur Farbfähigkeit durch den sogenannten “Color Rendering Index”.

Ultraviolettes (UV) Licht wird in Zusammenhang mit Fluoreszenz eingesetzt, um organische Substanzen (Fingerabdrücke, Klebereste, Öle, Fette usw.) zu detektieren. Das UV-Licht wird dabei in sichtbares Licht gewandelt und kann dann detektiert werden.

8.4 Fremdlicht

Ungewünschtes Licht, das nicht vom eigentlichen Beleuchtungssystem generiert wird, ist ein ernstzunehmendes Problem in vielen BV-System. Dieses sogenannte Fremdlicht steht nicht unter der direkten Kontrolle vom BV-System. Das Hauptproblem ist dabei meist, dass das Fremdlicht in nicht vorhersehbarer Weise zeitlich variiert und damit die Funktion des BV-Systems in erheblichem oder gar fatalem Maße stört.

Es ist daher dafür zu sorgen², dass der Fremdlichtanteil deutlich unterhalb des Signallichtanteils liegt. Verschiedene Methoden sind hier gebräuchlich:

Kapselung: Die direkteste Möglichkeit der Vermeidung von Fremdlicht ist, den optischen relevanten Anteil des BV-Systems in ein lichtdichtes Gehäuse zu bringen. Diese an sich sehr preisgünstige Lösung ist aus verschiedensten Gründen (z.B. Zuführung der Teile, Temperaturerhöhung) oft nicht praktikabel.

Pulse: Typischerweise ist das Fremdlicht (näherungsweise) konstant³. Daher kann man eine deutliche Reduzierung des prozentualen Fremdlichtanteils erreichen, wenn man es schafft, die für die Beleuchtung verwendete Energie in einem kurzen Puls abzugeben und den Bildsensor nur während der Pulszeit zu belichten. LEDs und viele Laser sind hierfür geeignete Beleuch-

²algorithmienabhängig

³Eine wichtige und beachtenswerte Ausnahme hiervon ist das durch Leuchtstoffröhren (Fabrikbeleuchtung) induzierte Fremdlicht, das mit 50 Hz periodisch schwankt.

tungsquellen, die solche eine Pulsung mit kurzzeitig sehr hoher Leistung ermöglichen.

Natürlich ist eine exakte Synchronisierung von Bildsensor und Beleuchtung notwendig. Eine gewisse Toleranz wird in der Praxis möglich, wenn der Beleuchtungspuls etwas (z.B. Faktor 2) länger als der Belichtungspuls gewählt wird.

Wellenlänge: Auch die spektrale Abstrahlcharakteristik einer Quelle kann zur effektiven Fremdlichtunterdrückung genutzt werden. Wenn als Beleuchtungsquelle des BV-Systems ein Spektralbereich verwendet wird, der anteilmäßig im Fremdlicht nur gering vorhanden ist, kann vor dem Bildsensor ein passender Spektralfilter eingesetzt werden, der das Fremdlicht stark reduziert.

Ein typisches Beispiel ist das breitbandige Sonnenlicht. Wenn zur Beleuchtung eine vergleichsweise monochromatische LED (Halbwertsbreite z.B. 10 nm) eingesetzt wird, dann kann ein entsprechender Spektralfilter eine Sonnenlichtabschwächung um den Faktor 30 erreichen⁴

Berechnet werden kann die Abschwächung, wenn man ein gewisses Spektrum des Fremdlichts annimmt. Für den Strahlungsfluss nach dem Filter ergibt sich

$$\Phi_e[W] = (\lambda[\mu m] - 0.4) \frac{FWHM[nm]}{10} \quad @ 3000 \text{ K, } 1000 \text{ lm} \quad (8.1)$$

$$\Phi_e[W] = FWHM[nm] \cdot 0.02 \quad @ 6000 \text{ K, } 1000 \text{ lm} \quad (8.2)$$

Dabei bezeichnet $FWHM$ die spektrale Halbwertsbreite des eingesetzten Filters.

Beispiel: Sie messen Sonnenlicht mit einer Beleuchtungsstärke von 10.000 lux auf den Objekten, die zu inspizieren sind. Natürlich ist diese Beleuchtungsstärke nicht konstant sondern variiert und führt so zu Fehlern bei der Bildauswertung. Daher verwenden Sie eine LED mit einer spektralen Halbwertsbreite von 10 nm

⁴Unter der Annahme einer konstanten spektralen Empfindlichkeit des Bildsensors über einen Bereich von 300 nm.

zur Beleuchtung und kameraseitig einen entsprechenden Bandpassfilter. Wie stark sollte die durch LED realisierte Bestrahlungsstärke auf dem Objekt gewählt werden, wenn die Beleuchtungsstärke aufgrund der Sonne maximal 10% der LED-Stärke erreichen darf ?

Lösung: Für die Bestrahlungsstärke aufgrund der Sonne ($T=6000\text{ K}$) ergibt sich mit Gl. 8.2 $\Phi_e = 10 \cdot 0.02 = 0.2\text{ W/m}^2$. Das bedeutet, dass das LED-Beleuchtungssystem mindestens 2 W/m^2 erreichen sollte.

Beispiel: Um die selbe Fremdlichtunterdrückung zu erzielen wollen Sie anstatt des Farbfilters eine Pulsbeleuchtung verwenden. Wie kurz müssen die Pulse (und die entsprechende Belichtungszeit) sein? Gehen Sie von einer Empfindlichkeit der Kamera von 300 nm (Halbwertsbreite) aus.

Lösung: Die 10.000 lx entsprechen $10 \cdot 0.02 \cdot 300 = 60\text{ W/m}^2$. Durch die zeitsequentielle Technik muss dieser Wert auf 0.2 W/m^2 , d.h. um den Faktor 300, reduziert werden. d.h. die Pulslänge bzw. die Belichtungszeit darf $3,3\text{ ms}$ nicht übersteigen.

8.5 Lichtquellen

Bevor wir auf die in der industriellen Bildverarbeitung wesentlichen Lichtquellentypen und ihre Eigenschaften eingehen wollen wir zunächst generelle Beurteilungskriterien angeben.

Erstaunlicherweise sind — trotz vergleichsweise hoher Preise — bei professionellen Bildverarbeitungsbeleuchtungen meist so gut wie keine technischen Daten verfügbar. Letztlich ist der Grund, dass lichttechnische Größen für die überwiegende Anzahl an Bildverarbeitungsexperten ein Buch mit sieben Siegeln ist und daher entsprechende Daten praktisch nie hinterfragt bzw. verlangt werden.

Teilweise sind aber zumindest ein Teil der relevanten Informationen verfügbar und zur Auslegung eines Systems bzw. der sinnvollen Auswahl der Komponenten sollte man sich nicht scheuen, die notwendigen technischen Daten einzufordern.

Generell sind nicht alle Angaben für alle Lichtquellen bzw. Beleuchtungsmodule relevant und die gewünschten Daten hängen davon ab, ob eine zusätzliche Beleuchtungsoptik eingesetzt wird.

Abgestrahlte optische Leistung: Meist ist leider nur die elektrische Leistungsaufnahme angegeben. Für die Auslegung des Systems ist aber natürlich zunächst die optisch abgegebene Leistung von Bedeutung. Unter Umständen kann die Anforderung an die CW Leistung reduziert werden, wenn ein gepulster Betrieb möglich ist. Beachten Sie, dass die Lebensdauer und Stabilität positiv beeinflusst werden, wenn Sie die Lichtquelle bei reduzierter Leistung betreiben können.

Möglichkeit zur Pulsung: Sowohl zur Fremdlichtunterdrückung als auch zur Vermeidung von Bewegungsunschärfen durch kurze Belichtungszeiten kann es sinnvoll sein, die Lichtquelle synchronisiert mit der Bildaufnahme gepulst betreiben zu können.

Ansteuerelektronik: Insbesondere für die Pulsung ist eine entsprechende Ansteuerelektronik notwendig.

Spektrale Abstrahlcharakteristik: In welchem Spektralbereich wird das Licht emittiert.

Zeitliche Konstanz der Abstrahlung: Viele Lichtquellen haben eine deutliche zeitliche Variation der emittierten Lichtleistung. Besonders stark, aber für viele Anwendungen nicht entscheidend, ist dabei die Variation innerhalb der "Aufwärmphase". Unter Umständen sind die charakteristischen Variationszeiten deutlich kürzer als die Belichtungszeit, so dass die Variation teilweise gemittelt wird.

Alterung und Lebensdauer: Die Lebensdauer ist ein in der industriellen Praxis besonders wichtiger Parameter denn der Ausfall eines Systems in der Produktion ist oft mit erheblichen Folgekosten verbunden. Dementsprechend ist auf eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit zu achten. Üblicherweise lässt sich die Lebensdauer der Lichtquelle deutlich verlängern indem die Quelle bei einer abgesenkten Leistung betrieben wird. Die Lichtquelle ist in diesem Fall also überdimensioniert auszulegen.

Abstrahlgeometrie: Hinsichtlich der Abstrahlgeometrie ist zu beachten, dass die Objektbeleuchtung ausreichend homogen ist, es kann aber auch entscheidend sein, ob zuviel überschüssiges Licht generiert wird.

Effizienz: Eine mangelhafte Effizienz kann bei Anwendungen mit hoher Lichtleistung zu sehr viel Abwärme und hohen Anforderungen an die Stromversorgung führen. Insbesondere die Abwärme kann zu einer Vielzahl von Sekundärproblemen (z.B. frühzeitige Alterung von Komponenten, thermische Ausdehnung von System und Objekt) führen

Homogenität: Die Homogenität der Beleuchtung kann, muss aber nicht wichtig sein. Oftmals ergibt sich sowieso aufgrund der Abbildungsoptik durch Vignettierung eine inhomogene sensorseitige Bestrahlungsstärke, die per Software ausgeglichen wird. Deutliche Inhomogenitäten können aber aufgrund des eventuell verringerten Signal-Rausch-Verhältnisses in bestimmten Bildbereichen aber zu subtilen Problemen bei der Auswertung führen.

Abwärme und Infrarotlichtanteil: siehe Effizienz.

Color Rendering Index: Je kontinuierlicher das Spektrum einer Quelle ist, desto eher ist es zur Beurteilung von Farben geeignet. Der Color Rendering Index liegt zwischen 0 und 100 und gibt diese Fähigkeit an. Sonnenlicht, Licht von Glühbirnen und Xenonlampen erreicht nahezu 100 während Leuchtstoffröhren nur etwa 75 erzielen. Bei LEDs hängt der Color Rendering Index stark von der konkreten Funktionsweise der (weißen) LED ab. Metaldampf lampen haben ein besonders ungeeignetes Spektrum zur Farbbeurteilung.

Preis: Bilden Sie eine Gesamtbilanz bei der etwaige Wartungs-/Austauschkosten verschiedener Quellen einbezogen sind. Meist sind Austausch/Wartung sehr viel teurer als die eigentliche Quelle.

Bauform: Die Bauform muss natürlich die gegebenen aufgabenspezifischen Randbedingungen erfüllen

notwendige Spannung, Strom, EMV, Verpolungsschutz: Subtile Probleme können aufgrund elektromagnetischer Störeinstrahlung bei industriellen Anlagen oder des Inspektionssystems selbst auftreten. Daher ist insbesondere bei hohen Lichtleistungen und den damit verbundenen hohen elektrischen Leistungen zu prüfen, ob Probleme auftreten können.

Vibrationsempfindlichkeit: Vibrationen können bei verschiedenen Leuchtmitteln und Leuchtkörpern zu unterschiedlichen Störungen führen. Diese können vom reinen mechanischen Defekt, über eine Störung der elektrischen Zuleitung (Kontaktprobleme) bis zur Vibration der Lage der Lichtemission (vibrierende Glühwendel) reichen.

Staubschutz: Verschmutzungen können sich auf transparenten Flächen der Lichtquelle oder des Beleuchtungssystems niederschlagen. Bei hoher Lichtleistung kann dies durch Absorption des Lichts an den Verschmutzungen zu einem Einbrand mit Schädigung der entsprechenden Flächen oder Brandgefahr führen. Geeignete Vorrichtungen zur Vermeidung der Verschmutzung sind in diesem Fall notwendig.

Wasserempfindlichkeit: Eventuell muss die Bauform der Leuchte so gestaltet sein, dass Spritzwasser toleriert wird. Hierzu ist eine geeignete Kapselung oder Lichtleitung notwendig.

Explosionsgefahr: Lampen, die unter hohem oder tiefem Druck arbeiten führen unter Umständen zu einem erheblichen Schädigungspotential aufgrund einer möglichen Explosion/Implosion.

Leider wird wie bereits gesagt kaum ein Bereich der Bildverarbeitung so stiefmütterlich behandelt wie die Beleuchtung. Daher fehlen typischerweise — auch bei sehr teuren Beleuchtungssystemen — konkrete technische Daten und es ergeben sich Spezifikation der Art “sehr hell” oder ähnlich. Oftmals finden sich keine Angaben, die über die bloße Nennung der elektrischen Anschlussleistung und der Geometrie des Systems hinausgehen.

Sie sollten daraus nicht den Schluss ziehen, dass diese Angaben nicht essentiell wären und es nicht der Mühe lohnt, sich mit den korrekten Angaben zu beschäftigen denn es wird Ihnen nicht gelingen, eine geeignete Beleuchtung zu spezifizieren, wenn die entsprechenden Kenntnisse nicht vorhanden sind. Vielmehr müssen Sie in der Regel beim Hersteller eines Beleuchtungssystems im Zweifelsfall schlicht die relevanten Daten erfragen.

Hinsichtlich der Bauformen von Lichtquellen werden vor allem folgende Grundtypen unterschieden:

Ringlicht: Sehr gebräuchliche Bauform bei der die Lichtquelle ringartig zentriert

zum Objekt und zur Kamera angeordnet wird (Abb. 8.1.10). Das Licht strahlt also radial unter denselben Winkeln auf das Objekt. Die vertikale Position kann in weiten Bereichen selbst gewählt werden⁵. Rein geometrisch ergibt sich durch die Höhe der Quelle und die Gesamtgeometrie ein deutlich unterschiedliches Beleuchtungsverhalten. Es ist weiterhin zu unterscheiden, ob eine zusätzliche Diffusorschicht vor den LEDs verwendet wird.

Dombeleuchtung: Die Dombeleuchtung liefert sehr homogene und diffuse Beleuchtungen und schirmt gleichzeitig das Objekt deutlich von Fremdlicht ab. Das Grundprinzip ist die Streuung an der Kugeloberfläche (vgl. Abb. 8.1.4). Problematisch sind aber insbesondere bei etwas größeren Objekten die Kosten sowie der Platzbedarf.

Flat-Dom: Eine Alternative mit geringerem Platzbedarf und reduzierten Kosten, bei der die Abschirmwirkung entfällt und das Winkelspektrum der Beleuchtungsrichtungen reduziert ist (Abb. 8.1.5).

Flächenstrahler: Werden ebenfalls zur homogenen und diffusen Ausleuchtung, vor allem großer Flächen eingesetzt. Je nach Homogenisierungsgrad können sie recht preiswert sein.

Linienlichter: Linienhafte Bauform (z.B. "Neonröhre" oder LED-Zeile) zur gerichteten Beleuchtung bei zweidimensionaler Abbildung oder zur Beleuchtung einer Zeile.

Punktstrahler: In verschiedenen Bauformen (z.B. Fasern, Lichtleiter, Halogenspot) zur gerichteten Beleuchtung oder in Verbindung mit einer Diffusorfläche als Flächenstrahler.

Generell ist bei den entsprechenden Quellen immer darauf zu achten, dass die Homogenität, die für viele Anwendungen wichtig ist, nur für bestimmte Geometrien garantiert ist. D.h. das Objekt darf nicht zu groß sein und die Relativabstände von Kamera, Objekt und Quelle zueinander müssen passend gewählt werden.

⁵Bei sehr naher Entfernung zum Objekt, z.B. als Dunkelfeldbeleuchtung, ist allerdings eine andere Abstrahlrichtung für die einzelnen LEDs zu wählen. Die geplante Position ist also zu beachten.

8.5.1 Thermische Quellen: Halogenlampen

Thermische Lichtquellen haben für uns traditionell die größte Bedeutung. Die meisten in der Natur vorkommenden Quellen (z.B. Sonne, Blitz, Feuer) sind thermische Quellen. Die Energiezufuhr, die nachfolgend dann zu einer Emission führt, wird per Wärme zugeführt. Trotz der völlig unterschiedlichen thermischen Quellen wird ihr Verhalten doch im wesentlichen durch dieselben Grundgleichungen bestimmt. Diese Gleichungen sollen hier ohne Ableitung⁶ kurz erläutert werden.

Strenggenommen gelten sie für einen sogenannten *schwarzen Strahler*. Einen entsprechenden Strahler kann man sich als ein kleines Loch in einem beheizten Körper denken. Die Unterschiede zu der Abstrahlung anderer beheizter Körper sind aber für unsere Zwecke vernachlässigbar.

Das *Plancksche Strahlungsgesetz* beschreibt die Strahldichte L , also den Strahlungsfluss (Einheit W) einer Einheitsfläche, die in einen bestimmten Raumwinkel emittiert, in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Temperatur des Strahlers:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (8.3)$$

$\Omega_0 = 1/\text{sr}$ ist dabei lediglich eine Einheitenkonstante, also eine Konstante, die dafür sorgt, dass in der Gleichung die Einheiten korrekt sind. $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js ist die Plancksche Konstante, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit und $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K die *Boltzmann Konstante*. Mit dieser Gleichung ist es somit möglich, die spektrale Abstrahlung zu berechnen, wenn die Temperatur der Quelle bekannt ist.

Oft interessiert man sich nicht für die Abstrahlung in einen bestimmten Raumwinkelbereich bei einer Frequenz, sondern für die gesamte abgestrahlte Leistung. Man kommt durch Integration dann zum *Stefan-Boltzmann-Gesetz*:

$$P(T) = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (8.4)$$

Dabei ist $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ eine Konstante. Man erkennt, dass umso mehr Leistung abgestrahlt wird, je höher die Temperatur ist (vgl. Abb. 8.5.13). Das theoretische Maximum an Effizienz, das mit einem thermischen Strahler realisiert werden kann liegt bei 95 lm/W. In der Praxis kommt man bei Wolfram zu einem Wert

⁶z.B. Haken/Wolf: Atom- und Quantenphysik

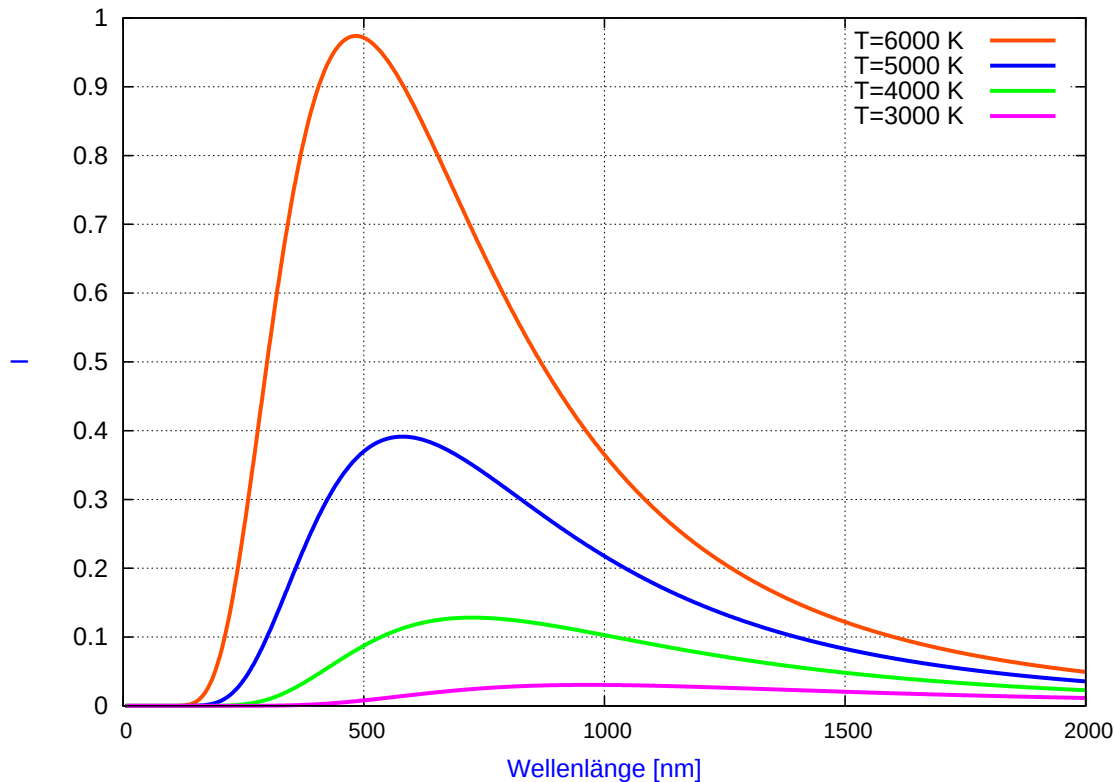


Abbildung 8.5.13: Spektrale Abstrahlcharakteristik einer thermischen Lichtquelle (Plancksches Strahlungsgesetz). Dabei wurden die Einzelkurven nicht zusätzlich normiert (heiße Quellen strahlen mehr Energie ab als kalte Quellen).

von maximal 54 lm/W. Im Vergleich hierzu lässt sich nicht-thermisches, „weißes“ Licht theoretisch mit Wirkungsgraden von bis zu 200 lm/W generieren.

Verschiedene Stoffe derselben Temperatur haben zwar dieselbe spektrale Abstrahlcharakteristik (Plancksches Gesetz), strahlen aber sehr verschiedene Leistungen ab.⁷ Dabei hängt der Emissionsgrad nicht nur vom Material, sondern auch von der Oberflächenbearbeitung ab⁸.

Bei der von *Edison* und unabhängig davon von *Swan* entwickelten *Glühbirne* wird ein dünner Draht durch Stromfluss erwärmt. Für den Draht kommen dabei nur Materialien in Frage, die bei hoher Temperatur (ca. 2000 °C bis 3000 °C) nicht sofort verdampfen. *Wolfram* ist hierfür ein sehr geeignetes Material. Um die Lebensdauer in sinnvolle Größenordnungen (ca. 1.000 Stunden) zu bringen, ist die Glühbirne mit inertem Gas (z.B. Stickstoff) gefüllt.⁹

⁷Viele Strahler sind nicht perfekt „schwarz“, sondern emittieren weniger Leistung. Solche Strahler werden auch als „graue Strahler“ bezeichnet, wenn die Form des Emissionsspektrums weitgehend dem Planckschen Strahlungsgesetz folgt.

⁸Eine Tabelle einiger Materialien findet man unter <http://www.thermographie-online.com/emissionsgrad.htm>

⁹Eine Evakuierung der Glühbirne funktioniert natürlich ebenfalls.

Die im Vergleich zu Sonnenlicht (ca. 6000 K) geringe Temperatur führt zu einem recht „warmen“ Licht. Die *Farbtemperatur* gibt einfach die Temperatur eines Planckschen Strahlers an, der zu einem ähnlichen Spektrum führt. Licht, das von einem Strahler mit einem Spektrum gemäß Planck mit geringerer Temperatur als die Sonne herrührt, wird als „warm“ bezeichnet.

Gewöhnliche Glühbirnen werden praktisch kaum in der industriellen Bildverarbeitung eingesetzt, können aber oft als an sich unerwünschtes Fremdlicht auftreten. Stattdessen wird oft eine Abwandlung, die *Halogenlampe* eingesetzt. Sie funktioniert im Prinzip gleich wie eine herkömmliche Glühbirne. Allerdings werden dem Füllgas Halogene beigemischt. Dadurch wird eine Schwärzung des Glaskolbens verhindert. Sowohl die Lebensdauer (ca. 1,500 bis 2000 Stunden) als auch die Effizienz (ca. 15 bis 25 lm/W) ist gegenüber der Glühbirne (ca. 15 lm/W) besser. Die etwas höhere Temperatur der Glühwendel (ca. 3000 °C) ergibt ein etwas natürlicheres, d.h. näher beim Sonnenlicht liegendes Spektrum. Ein Betrieb mit niedrigen Spannungen ist möglich.

Eine Veränderung der Farbtemperatur (in der Regel zu kälteren Farbtemperaturen) wird oft durch spezielle Reflektorbeschichtungen realisiert. Rote Lichtanteile werden dabei teilweise vom Reflektor der Lampe transmittiert und daher nicht ins zu beleuchtende Gebiet reflektiert.

Als Vor- und Nachteile von Halogenbeleuchtungen kann man annehmen:

- + sehr preisgünstig
- + kontinuierliches Spektrum (→ guter Farbwiedergabeindex)
- + geringe Ansteuerspannung
- o Farbtemperatur ca. 3000 K
- Lebensdauer gering (< 2000 Stunden)
- starker Abfall des Lichtflusses mit Alter
- Anfällig gegen Vibrationen
- geringe Effizienz, viel Abwärme
- keine Pulsung möglich

8.5.2 Bogenlampen

Bei Bogenlampen werden zwei Elektroden durch ein Gas (z.B. Luft, Xenon, meist unter hohem Druck) voneinander getrennt. Bei hoher Spannung ergibt sich ein Lichtbogen zwischen den Elektroden. Die ionisierte Luft führt einerseits zur Lichtaussendung, andererseits zu einer hohen Leitfähigkeit zwischen den Elektroden. Neben einem kontinuierlichen Betrieb können die Lampen auch geblitzt eingesetzt werden und erreichen dann extrem hohe Leuchtdichten von bis zu 350.000 candelas. Die Farbtemperatur ist hoch (5.000 bis 10.000 K) und es ergibt sich ein einigermaßen kontinuierliches Spektrum. Die Effizienz beträgt bis zu 60 lm/W und die Quellen sind auch für sehr hohe Leistungen (mehrere kW elektrische Leistung) erhältlich. Sehr oft eingesetzt werden Kurzbogenlampen, z.B. XBO von Osram.

Beim Einsatz in der Bildverarbeitung kann — vor allem bei hohen Leistungen — der hohe Anteil an Infrarotlicht zu Problemen (z.B. Erwärmung der Szene) führen. Infrarotfilter müssen eine hohe Leistung abführen und entsprechend gekühlt werden. Ein Ausfall entsprechender Kühlkomponenten kann unter Umständen zu drastischen Problemen innerhalb der gesamten Produktion führen.

Als Vor- und Nachteile kann man annehmen:

- + Lebensdauer bis 10.000 Stunden
- + sehr hohe Strahl bzw. Leuchtdichten erzielbar
- Explosionsgefahr durch hohen Druck (→ potentielle Sicherheitsprobleme)
- teuer
- starke Wärmeproduktion
- UV Anteile im Licht (→ potentielle Sicherheitsprobleme)
- hohe Spannungen notwendig (→ potentielle Sicherheitsprobleme)
- Endhelligkeit wird erst nach Aufwärmphase erreicht.

8.5.3 Leuchtstofflampen

Die umgangssprachlich als *Neonröhren* bezeichneten Lichtquellen sind *Leuchtstofflampen* und damit *Entladungslampen*. Ein von Strom durchflossenes Gas (z.B.

Quecksilberdampf) in einer teilevakuieren Röhre gibt dabei (in der Regel ultraviolette) Strahlung¹⁰ ab, die durch eine fluoreszierende *Leuchtschicht* in sichtbares Licht konvertiert wird¹¹, daher auch der Name “Fluoreszenzlampe”. Verschiedene Beschichtungen, die zu verschiedenen Spektren führen, sind gebräuchlich und verfügbar. Nur wenn die Lampe rötlich leuchtet, wird dabei Neon als Leuchtgas verwendet. Bei der Verwendung von Argon ergibt sich ein blaugrünes Leuchten, Krypton führt zu Lavendelfärbungen und Xenon leuchtet bläulich.¹²

Damit es zum Stromfluss in der Röhre kommt, werden zunächst Elektronen durch *Glühemission*¹³ erzeugt. Die emittierten Elektronen werden zur positiven Gegenelektrode beschleunigt und führen dabei durch Stöße zu Ionen (→ erhöhte Leitfähigkeit) und zur Atomanregung mit nachfolgender Lichtemission. Die Lebensdauer ist gegenüber der Glühbirne um den Faktor 10 (ca. 10.000 bis 50.000 Stunden) besser und die Effizienz ist mit ca. 65 bis 95 lm/W sehr hoch. Durch die Beschichtung lässt sich die Farbe der Lampe variieren. Die Farbtemperatur liegt dabei zwischen ca. 3.000 und 6.000 K.

Stromsparlampen sind letztlich gewöhnliche Leuchtstofflampen. Lediglich die Röhren selbst sind gebogen um eine geringere Länge der Lampe zu erzielen. Das elektronische Vorschaltgerät für die Zündung ist in der Regel im Sockel der Lampe integriert.

Als Vor- und Nachteile kann man annehmen:

- + Lebensdauer bis 10.000 Stunden
- + sehr preisgünstig
- + sehr hohe Effizienz
- + homogene Beleuchtung großer Flächen

o verschiedene Farbtemperaturen von 3000 bis 6000 K

¹⁰Bei Quecksilber vor allem $\lambda=254$ nm.

¹¹Wenn diese Leuchtschicht beschädigt ist, dann tritt ultraviolettes Licht aus (auch wenn vom Glas selbst einiges absorbiert wird) und es besteht dementsprechend eine Gesundheitsgefahr. Wenn die mit Quecksilber (giftig !) gefüllte Röhre zerplatzt, dann ist das natürlich ebenfalls ungünstig.

¹²Durch zusätzliche Fluoreszenzbeschichtungen wird allerdings das Spektrum der Entladungslampe nochmals (teilweise deutlich) geändert.

¹³Der hierbei ablaufende Vorgang ist im Detail auch recht komplex. Bei alten Röhren wird ein sogenannter „Starter“ benötigt, neuere Röhren werden meist mit einem elektronischen Vorschaltgerät betrieben (bessere Effizienz, kein Flimmern, kein Brummen, längere Lebensdauer).

- sehr unflexible, große Bauform
- stark diskontinuierliches Spektrum
- keine Pulsung möglich
- Zeitliches Flackern

8.5.4 Lichtemittierende Dioden (LED)

Das Grundprinzip von *Leuchtdioden* (Lichtemittierende Dioden, LEDs) basiert auf einem pn-Übergang. Es handelt sich bei der LED also um eine Diode, die in Durchlassrichtung betrieben wird. Beim Stromfluss durch die Grenzschicht zwischen n- und p-dotiertem Halbleitermaterial findet eine Rekombination von Elektronen und Löchern statt. Dabei wird Energie frei, die in Form von Licht abgestrahlt wird. Man spricht von *Elektrolumineszenz*.



Abbildung 8.5.14: LEDs werden heute in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt.

LEDs haben im Vergleich zu anderen Quellen eine Reihe herausragender Merkmale. Bei geringen Kosten wird eine lange Lebensdauer und eine hohe Robustheit bei guten bis sehr guten Effizienzen erzielt. Zusätzlich benötigen sie nur wenig Bauraum und sind daher gestalterisch sehr gut einsetzbar.

Die Energiekonversion (elektrisch $\rightarrow$ optisch) findet mit einer Effizienz von nahezu 100% statt. Die Gesamteffizienz der LED ist allerdings deutlich geringer und liegt bei ca. 30% denn letztlich ist es schwierig, alle der in der dünnen Grenzschicht (einige Angström bis ca. $1\text{ }\mu\text{m}$) generierten Photonen verlustfrei nach außen zu bringen.

Trotzdem ist die Effizienz im Vergleich mit anderen Lichtquellen sehr hoch. Inzwischen lassen sich Effizienzen von bis zu 55 lm/W erzielen¹⁴. Ebenfalls möglich sind hohe Leistungen von z.B. 200 lm bei 10 W (OSTAR Lighting). Bei vielen LEDs ist ein gepulster Betrieb möglich. Dadurch kann die Leistung im Puls um bis zu den Faktor 10 gesteigert werden.

Die Frequenz der abgestrahlten Photonen wird durch die Bandstruktur der Halbleiter bestimmt und führt zu relativ schmalbandigem (ca. 10 bis 50 nm Halbwertsbreite) Licht. Um zu weißen LEDs zu kommen sind verschiedene Methoden im Einsatz. Am gebräuchlichsten ist die Nutzung einer fluoreszierenden *Konversionsschicht*, die das kurzwellige Licht der LED in ein breitbandiges Fluoreszenzlicht umwandelt. Sehr gebräuchlich (und kostengünstig) ist die Kombination einer blauen LED und einer gelben Konversionsschicht. Es handelt sich also um eine *dichromatische Farbmischung*, Blau + Gelb = Weiß. Ausgewogenere Spektren erhält man durch die Mischung von drei oder vier Spektren. Natürlich lassen sich auch mehrere LEDs mit unterschiedlicher Farbe direkt mischen. Auch dieser Ansatz wird oft eingesetzt. Generell ergibt sich dadurch ein etwas „künstlicheres“ Spektrum (Peaks), aber die Energieeffizienz ist deutlich höher (beim Einsatz von fluoreszierenden Konversionsschichten wird ja ein Teil der Energie der blauen Photonen in Wärme umgewandelt und steht so für die Beleuchtung nicht mehr zur Verfügung). Einzelne LEDs sind vergleichsweise schlecht zur Beleuchtung von Objekten für eine sinnvolle Farbbeurteilung geeignet. Erst eine Kombination von mindestens vier LEDs liefert brauchbare Farbwiedergabewerte¹⁵.

¹⁴Für kleine Flächen sind die Effizienzen teilweise deutlich höher (100 lm/W) und die Hoffnung besteht, diese Effizienzen auch auf größere Flächen übertragen zu können.[24]

¹⁵Bezeichnet durch den Farbwiedergabewert R_a , der in diesem Fall größer 90 erreichen kann.

Vor- und Nachteile:

- + Lebensdauer bis 100.000 Stunden
- + preisgünstig
- + sehr hohe Effizienz
- + einfache Ansteuerung
- + pulsbar
- + Punktstrahler mit hohen Leuchtdichten, geringe Baugröße
- 0 spektrale Abstrahlcharakteristik sehr eingeschränkt → gut für Fremdlichtunterdrückung
- sehr hohe Strahlungsflüsse nicht möglich
- oft problematisches Spektrum → Farbwiedergabeindex schlecht.

8.5.5 Laser

Kohärentes Licht, wie es von Lasern ausgesendet wird kann Vor- aber auch Nachteile bei der Beleuchtung haben. Holografische und interferometrischer Messverfahren arbeiten prinzipbedingt mit kohärentem Licht, aber auch die gewöhnliche Beleuchtung kann kohärent erfolgen. Insbesondere wenn auf extrem kleinen Flächen eine hohe Bestrahlungsstärke erzielt werden soll werden oft Laser eingesetzt. Ein weiterer Vorteil ist die vergleichsweise hohe Schärfentiefe bei der Generierung von einzelnen Lichtpunkten. Dies ist z.B. bei der Lasertriangulation von Vorteil.

Aber auch andere inhomogene Lichtverteilungen lassen sich oft vorteilhaft und mit hoher Effizienz mit Lasern realisieren. Abb. ?? zeigt ein typisches Beispiel eines holografischen Mustergenerators. Die Elemente werden auch als *Diffraktiv-optische Elemente*, *DOE* bezeichnet. Zwischen dem eingebrachten Hologramm, einem strukturierten Plastik- oder Glasselement, und der zu beleuchtenden Ebene besteht (näherungsweise) eine zweidimensionale Fouriertransformationsbeziehung. Ein passend strukturiertes Hologramm führt so zu der gewünschten Bestrahlungsstärke auf dem Objekt. Verschiedenste, typische Muster (Schachbretter, Kreuze, Kreise, Linien) sind kommerziell erhältlich und es lassen sich auch

individualisierte Muster realisieren. In Zusammenhang mit LCDs können auch programmierbare Lichtmuster generiert werden.

Problematisch an einer Beleuchtung rauer Oberflächen, wie sie typischerweise in der industriellen Bildverarbeitung vorkommen, sind die sich ergebenden Speckles (vgl. Abschnitt 5.9.17).

Generell ist bei Lasern auf das Strahlprofil zu achten, wenn eine sehr hochaufgelöste Lichtverteilung realisiert werden soll, z.B. bei strukturierter (z.B. Linien, Kreuze) oder punktueller Beleuchtung. Auch zeitliche Schwankungen können ein Problem darstellen. Das vom Laser letztlich emittierte Licht kann aus einer einzelnen sogenannten "Mode" oder einer Kombination verschiedener Moden bestehen. Klassischerweise denkt man zunächst an die einzelne Mode. Die niedrigste Mode, die sogenannte TEM_{00} Mode entspricht gerade einer Gaußschen Verteilung und die Fokussierbarkeit dieser Mode ist optimal. Andere Moden erzielen dagegen nur vergrößerte Spots und das Verhältnis der realisierten Spotfläche im Vergleich zur Spotfläche für einen Gaußmode wird mit M^2 bezeichnet. Für Anwendungen, bei denen die beste Fokussierbarkeit wesentlich ist, sollte also das M^2 nahe 1 bleiben.

Wesentlich für die Spezifikation sind

- Betriebsmodus (Continuous Wave oder gepulst)
- Leistung (pro Puls oder Continuous Wave (CW))
- Wellenlänge
- Emittierte Mode (evtl. Angabe M^2)
- Kohärenzlänge
- Polarisationsverhalten
- zeitliche Stabilität (Rauschen)

Vor- und Nachteile:

- + extrem hohen Leuchtdichten, geringe Baugröße
- + extrem monochromatisch → sehr gute Fremdlichtunterdrückung

- + (teilweise) pulsbar
- + (teilweise) hohe Effizienz
- eventuell Laserschutz notwendig
- Speckles und andere kohärente Artefakte

8.6 Spezielle Techniken

8.6.1 Fluoreszenz

Die Anregung von Elektronen in Atomen kann auch durch Licht erfolgen. Eingeschaltete Photonen führen zu angeregten Energieniveaus. Nach einer gewissen Verweildauer der Elektronen in diesen Niveaus fallen die Elektronen zurück auf ihre Grundniveaus. Dabei werden Photonen abgestrahlt. Unter Umständen erfolgt der Übergang in den Grundzustand (strahlungslos) über Zwischenniveaus, so dass die Energie (und damit die Frequenz) der abgestrahlten Photonen geringer ist als die Energie der anregenden Photonen. Bei einer Einstrahlung mit blauem Licht wird dementsprechend z.B. rotes, grünes oder gelbes Licht abgestrahlt.

Die Unterscheidung zwischen *Fluoreszenz* und *Phosphoreszenz* erfolgt anhand der Zeitdauer zwischen Anregung und Remission. Bei kurzen Zeiten kleiner 10^{-4} s spricht man von Fluoreszenz. Bei der Phosphoreszenz kann die Dauer der Abstrahlung sehr lange (bis zu mehrere Stunden) sein und findet Anwendung in einer Vielzahl von Spielzeug und Notbeleuchtungen. Phosphoreszenz kann im übrigen nicht nur durch Bestrahlung mit Licht, sondern auch mit Beschuss durch Elektronen (*Kathodolumineszenz*, *Brownsche Röhre* z.B. beim Fernsehgerät) auftreten.

Leuchtfarben, wie man sie z.B. von *Rettungswesten* kennt, erhalten ihre Leuchtkraft durch Fluoreszenz. Kurzwelliges, blaues und ultraviolettes Licht wird z.B. in orangefarbenes Licht (gelb und rot) konvertiert. Damit wird *mehr* Licht im gelb-roten Spektralbereich von der Rettungsweste emittiert als überhaupt im Anregungslicht vorhanden war. Die Weste leuchtet damit deutlich heller orange als eine mit gewöhnlicher orangener Farbe lackierte Fläche.

Fluoreszierende Stoffe finden sich auch in den sogenannten *Aufhellern* von

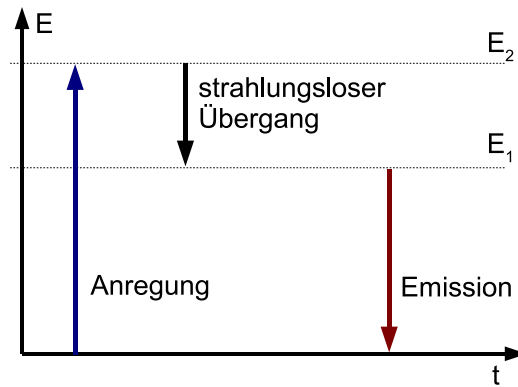


Abbildung 8.6.15: Fluoreszenz: Die Anregung von Elektronen mit energiereichen Photonen führt nach einer gewissen Zeit zu einer Remission von Photonen mit verringerter Energie und daher längerer Wellenlänge.

Waschmitteln. Sie sorgen für strahlendes Weiß, indem ultraviolettes Licht in weißes Licht konvertiert wird. Viele Stoffe in der Natur (vor allem **Bakterien** und **Mineralien**) fluoreszieren ebenfalls und zum Einsatz kommen fluoreszierende Pigmente auch bei **Sicherheitsanwendungen** (z.B. auf **Geldscheinen**).

Für die industrielle Bildverarbeitung wesentlich ist, dass organische Stoffe in der Regel fluoreszieren. Es wird so möglich, organische Rückstände (z.B. Öle, Fingerabdrücke) auf technischen Oberflächen per Fluoreszenz sichtbar zu machen. Es wird entsprechend mit intensivem kurzwelligem Licht (z.B. blau oder grün) beleuchtet und bei der Detektion wird die Anregungswellenlänge durch einen Spektralfilter geblockt. Das den Bildsensor erreichende Licht ist somit nur das fluoreszierende Licht, das von Positionen mit organischen Rückständen herrührt.

Kapitel 9

Bildsensoren

Kapitel 10

Andere Signalaufnehmer

Kapitel 11

Spezifikation

In diesem Kapitel werden Sie unter anderem lernen:

- Wie die Anforderung an ein Bildverarbeitungssystem zu spezifizieren ist.
- Was die Grundbegriffe der Messtechnik bedeuten.
- Wie Defekte zu spezifizieren sind.
- Was bei der Abnahme und Spezifikation zu beachten ist.

Bildverarbeitungssysteme sind in aller Regel keine Produkte “von der Stange” sondern werden für eine ganz spezielle Anwendung realisiert. Daher muss bei der Kommunikation und Vertragsgestaltung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer, also dem Anbieter der Bildverarbeitungslösung, klar definiert werden, welche Aufgabe wie gelöst werden soll und wie letztlich entschieden wird, ob das realisierte System letztlich die Anforderungen erfüllt. Grundsätzlich werden diese Festlegungen in zwei zentralen Dokumenten vorgenommen:

Lastenheft: Hier definiert der Auftraggeber möglichst exakt, welche Aufgaben das System (aktuell und zukünftig) zu erfüllen hat. Alle wesentlichen Nebenbedingungen werden genannt. Es sollte auch der bisherige Stand innerhalb der Fertigung beschrieben sein. Es werden also der Ist-Zustand sowie der Soll-Zustand definiert. Teilweise muss das Dokument zusammen mit

einem unabhängigen Fachmann oder aber unter Mithilfe des Anbieters erstellt werden.

Das Lastenheft kann an verschiedene mögliche Auftragnehmer gegeben werden. Angebote basierend auf dem Lastenheft lassen sich so vergleichen.

Pflichtenheft: Basierend auf dem Lastenheft generiert der Anbieter ein Pflichtenheft indem die Aufgabe aus Sicht des Anbieters dargestellt wird und definiert wird, wie die Aufgabe prinzipiell gelöst werden soll. Hierbei werden in der Regel zentrale Komponenten des Systems bereits spezifiziert (z.B. Kameras, Objektive usw.).

Sinn beider Dokumente ist es, zum einen vertragliche Klarheit zu schaffen, zum anderen — und das ist an sich zentral — soll sichergestellt werden, dass der Anbieter die Aufgabenstellung und Wünsche des Auftraggebers voll verstanden hat und dass dem Auftraggeber mögliche Beschränkungen klar sind.

In der VDI Richtlinie 2632 sind Details zur Ausarbeitung von Lasten- und Pflichtenheften für die industrielle Bildverarbeitung angegeben. Generell ist aber zu sagen, dass eine Vielzahl an — oft anwendungsabhängigen — Richtlinien und Normen definieren, welche Parameter wie anzugeben sind. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wollen wir einige zentrale Punkte, die spezifiziert werden sollten, angeben:

- Grundaufgabenstellung (1D, 2D oder 3D, Klassifikation, dimensionelles Messen, Lageerkennung, Identifikation, Zählung, Vollständigkeitsprüfung, Code-Lesen, usw.)
- Bei messenden Systemen: Angaben der zu messenden Größen und zur Messunsicherheit oder ähnlicher Angaben (s.u.)
- Gesamtszene (Objektfeld, Hintergrund)
- Ziel und bisherige Vorgehensweise
- Angaben zu möglichen Störmerkmalen
- Objekt
 - Objektgeometrie
 - mögliche Verdeckung

- Objektposition und Orientierung (Lage- und Orientierungstoleranzen)
 - Zuführung (z.B. Fließband, Roboter, Angabe von Toleranzen), Bewegungszustand (insbesondere Variabilität der Geschwindigkeit), Vibrationen
 - Oberflächenbeschaffenheit und Material (matt, glänzend, BRDF, strukturiert, Rauheit, wellig, homogen, bedruckt usw., Farbe, Transluzenz)
 - Verschmutzung (partikuläre, filmische Verschmutzung, Fasern, Staub, Öl, Reinigungsrückstände usw.)
 - verschiedene Objektklassen, Variabilität der Objekte und ihrer Oberflächen¹.
- Defektspezifikation
 - Defektstatistik bei aktueller Produktion
 - Angaben zum Durchsatz
 - Angaben zur Fehlerfindungsstatistik (Detektionswahrscheinlichkeit, Falschklassifikationswahrscheinlichkeit usw.)
 - Umgebungsbedingungen
 - Fremdlicht
 - EMV
 - Vibrationen
 - Luftfeuchtigkeit
 - Reinraum
 - Angabe zu Schnittstellen (Qualitätsmanagement, Prozesssteuerung, Datenbanken, Statistik, Mensch-Maschine Schnittstelle, Fernwartung).
 - Angaben zur Inbetriebnahme
 - Angaben zur Abnahme
 - Ausfallswahrscheinlichkeit des Systems (Mean-time between failure, Umrüstbarkeit, Mean-time to Repair)

¹z.B. durch Alterung oder Produktvielfalt

11.1 Musterkatalog

Wie zuverlässig eine automatisierte Beurteilung per Bildverarbeitung funktioniert hängt in erheblichem Ausmaß natürlich von den konkreten Objekten und Defekten, die erkannt werden sollen, ab. Oftmals ist es daher notwendig, genügend repräsentative Testobjekte mit genügend repräsentativen Fehlern oder Merkmalen zur Verfügung zu haben. Hierzu dienen sogenannte Musterkataloge.

Idealerweise sollten für alle zu detektierende Defekte auf allen relevanten Bauteilen genügend Musterteile mit entsprechenden Defekten zur Verfügung stehen. Dies führt aber schnell zu einer kombinatorischen Explosion an notwendigen Musterteilen und insbesondere bei den Defekten ist es oft mehr als schwierig, Grenzdefekte für die Defektspezifikationen zur Verfügung zu haben. Beispielsweise kann spezifiziert sein, dass Krater mit einer Mindestbreite von $10\ \mu\text{m}$ und eine Mindestlänge von $20\ \mu\text{m}$ zu detektieren sind. Um das System zu testen, müssen entsprechende Bauteile mit Defekten in dieser Größenordnung vorliegen. Wenn die Defekte in der Produktion selten sind oder die Produktion eventuell noch nicht läuft, dann müssen entsprechende Defekte künstlich hergestellt werden und auf einem Referenzsystem vermessen werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass sich wesentliche Parameter der Objekte im Laufe der Zeit ändern können. Dies kann sich sowohl auf die produzierten Teile beziehen (Modifikation der Objekte für neue Serie) als auch auf die Teile des Musterkatalogs, die im Laufe der Zeit altern (z.B. oxidieren oder sich deformieren).

Der Musterkatalog ist daher ein wichtiges und problematisches Instrument, das zur Realisierung (und oft zur Abnahme) einer Bildverarbeitungslösung verwendet wird.

11.2 Messen, Prüfen und Rückführbarkeit

Sehr viele Systeme in der industriellen BV werden zur Prüfung von Objekten eingesetzt. Beim Prüfen wird untersucht, ob ein Objekt die an das Objekt gestellten Anforderungen erfüllt oder nicht. Oft können diese Anforderungen durch Messung überprüft werden, teilweise sind aber auch nicht-messende Anforderun-

gen relevant (z.B. Vollständigkeitsprüfung). Begrifflich ist die Messung also eine Möglichkeit, eine Prüfung durchzuführen.

Die Prüfung selbst kann man im übrigen auch als Klassifikationsaufgaben (z.B. in die beiden Klassen “Teil gut” bzw. “in Ordnung (IO)” oder “Teil schlecht” bzw. “Nicht in Ordnung (NIO)”) ansehen.

Wenn die Prüfung auf einer Messung beruht, dann muss klar sein, wie aussagekräftig das Messergebnis überhaupt ist. Neben dem eigentlichen Messwert ist also auch die Messunsicherheit entscheidend. Ein typisches Beispiel wäre die geometrische Länge eines Kratzers. Die von der Auswertesoftware in Pixeln berechnete Position bzw. ein Abstand (aber auch z.B. Helligkeitswerte) müssen in irgendeiner Form auf eine Referenz “rückgeführt” werden.

In irgendeiner Form muss meist eine Umrechnung z.B. von Pixeln nach metrischen Größen vorgenommen werden. Aufgrund von Verzeichnungen ist diese Umrechnung auch noch positionsabhängig. Hierzu muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Bei der Kalibrierung wird die Ausgabe des BV-Systems auf eine Maßgröße, z.B. Meter, “rückgeführt”. Die Rückführung erfolgt in der Praxis mit einem Referenzmesssystem, dessen Messunsicherheit bekannt ist, oder mittels Kalibrierobjekten, deren Toleranzen bekannt sind. Nur wenn eine entsprechende Rückführung durchgeführt wird ist eine Angabe von Messunsicherheiten sinnvoll.

Die mit Abstand wichtigste Rückführung in der industriellen BV ist die Kalibrierung der zweidimensionalen Bilder einer ebenen Fläche. Es geht also um die Messung von Strecken in der zweidimensionalen Objektebene. In aller Regel besteht die Rückführung darin, dass geeignete kalibrierte Testobjekte (z.B. Kalibriertargets) vermessen werden.

Für zweidimensionale geometrische Kalibrierungen werden also Maßstäbe benötigt, die kalibriert sind. Entsprechende Masken (in der Regel Chrom auf Glas) werden in vielfältiger Form (Punkte, Linien, Kreis, Strichmarken) und Größe kommerziell angeboten und sind unerlässlich.

Auch für die Helligkeitskalibrierung (Linearität der Bildaufnahme, radiometrische Kalibrierung) gibt es Kalibrierobjekte, bei denen unterschiedliche Felder exakt definierte optische Abschwächungen aufweisen.

Generell ist die Genauigkeit (bzw. die Toleranzen) entsprechender Kalibrier-

objekte (oder Referenzmesssysteme) natürlich wesentlich, um eine sinnvolle Rückführbarkeit zu gewährleisten.

Die für uns wesentlichen Begriffe der Messtechnik sollen hier kurz dargestellt werden. Details und Definitionen finden sich in DIN 1319.

Prüfung: Vergleich mit einer Forderung. z.B. kann gefordert werden, dass der Messwert innerhalb eines bestimmten Intervalls liegt. Allerdings ist Prüfung nicht auf Messergebnisse beschränkt sondern kann z.B. das Vorhandensein von Merkmalen "prüfen".

Auflösung: Kleinste Differenz der zu messenden Größe, die durch die Messung eindeutig unterschieden werden kann. Beachten Sie: Der Begriff der Auflösung wird in verschiedenen Kontexten, insbesondere der Optik, sehr unterschiedlich verwendet.

Messabweichung: Differenz von Messwert zu wahren Wert.

Messunsicherheit: Gibt zusammen mit dem Messwert ein Intervall an, indem der wahre Wert mit "hoher Wahrscheinlichkeit" liegt.² Umgekehrt kann angenommen werden, dass bei einer Messung mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Messwert im Intervall der Messunsicherheit um den wahren Wert erhalten wird. Teilweise wird die Messunsicherheit auch als relative Messunsicherheit, z.B. in Prozent, angegeben.

Genauigkeit: Ist ein nur qualitativ zu verwendender Begriff für die Messunsicherheit. Bei quantitativen Angaben sollte man also von Messunsicherheiten sprechen. Genauigkeit wird teilweise synonym mit Messunsicherheit verwendet.

Systematischer Fehler: Abweichung des Erwartungswerts vieler Messungen vom wahren Wert. Statistische Fehler sind also nicht enthalten.

Wiederholstandardabweichung: Standardabweichung der Messwerte unter Wiederholbedingungen.

²Ein quantitativer Vergleich verschiedener Messunsicherheiten macht daher nur Sinn, wenn dieselben statistischen Annahmen (z.B. 95% Vertrauensintervall) gemacht werden. Oft erfolgen die Angaben in Bezug zur Standardabweichung, also z.B. " 3σ ".

Präzision (precision): Der Messwert kann zwar durchaus falsch sein, aber bei wiederholter Messung ergibt sich immer derselbe (unter Umständen falsche) Messwert. Statistische Fehler sind also bei einer präzisen Messung klein.

Richtigkeit: Der Messwert kann zwar durchaus statistisch stark streuen, im Mittel ergibt sich aber der wahre Werte der zu messenden Größe.

Wiederholbarkeit (Repeatability): Am selben Bauteil wird vom selben System unter selben Bedingungen wiederholt gemessen³,

Reproduzierbarkeit (Reproducibility): Die Reproduzierbarkeit bezieht sich auf dieselbe Situation wie die der Wiederholbarkeit. Allerdings kann ein anderer Prüfer, die Messung/Prüfung durchführen oder aber das Messobjekt wird neu zugeführt. Im Gegensatz zur Wiederholbarkeit wird also der *gesamte* Messvorgang neu gestartet.

Das vollständige Messergebnis wird angegeben als Messwert $\pm$ Messunsicherheit. Der zentrale Begriff bei der Spezifikation eines Messfehlers ist also heute die Messunsicherheit. Ihre Bestimmung bzw. Spezifikation ist exakt im Guide of Uncertainty of Measurements (GUM) geregelt[25].⁴

Ob das bildverarbeitend messende Systeme seine Messung ausreichend ordentlich vollzieht kann als "Messfähigkeit" betrachtet werden. Wesentlich sind hierbei zufällige und systematische Fehler, aber auch die Fehler aufgrund der Rückführbarkeit (z.B. Unsicherheiten der Kalibrierkörper). Letztlich werden Faustregeln angewendet, mit denen entschieden wird, ob eine Messung zur Sicherstellung einer gewissen Bauteiltoleranz "fähig" ist. Eine typische Faustregel würde z.B. aussagen, dass $0.15 T/6\sigma > 1.3$ ist, Mit 6σ ist dann die Messunsicherheit für ein Vertrauensintervall von 6σ anzunehmen und T ist die erlaubte Toleranz. Wenn also die Messunsicherheit für die Messung einer Länge $10 \mu\text{m}$ (bei 1σ) beträgt, müssen wir von $60 \mu\text{m}$ ausgehen. Dementsprechend wäre das Messsystem (unter dieser willkürlichen Definition !) nur sinnvoll im Sinne einer Messprozessfähigkeit einsetzbar wenn $T > 1.3 \cdot 60/0.15 = 520 \mu\text{m}$. Meist wird aber nur die statistische Unsicherheit der Messung, also die Streuung, berücksichtigt, so dass die Bedingung weniger drastisch ist.

³Entscheidend ist aber oft, welche Zeitdauer zwischen den Messungen liegt bzw. ob sich Nebenbedingungen geändert haben könnten.

⁴Es existieren durchaus leicht unterschiedliche Definitionen der Messunsicherheit, die sich allerdings nicht wirklich widersprechen sondern eher verschiedene Aspekte betonen. Die traditionellen Definitionen gehen dabei von den an sich nicht bekannten wahren Werten von Messgrößen aus.

Die Anforderung mit 6σ ist auch deutlich härter als eine andere, sehr bekannte heuristische Regel, die *Goldene Regel der Messtechnik* nach der die zu prüfende Toleranz mindestens 10 mal der Messunsicherheit entspricht.

Für klassifizierende Systeme sind andere Parameter relevant. Allerdings ist zu beachten, dass diese Größen teilweise aus Messungen abgeleitete Größen sind. Die wesentlichen Größen und Begriffe werden anhand einer Defektdetektion erläutert.

Bei einer Klassifikation in 2 Klassen (z.B. Bauteil IO oder NIO) ergeben sich vier Möglichkeiten:

	Bauteil IO	Bauteil NIO
System sagt IO	richtig positiv	falsch positiv
System sagt NIO	falsch negativ	richtig negativ

Eine Vielzahl von Begriffen werden in der Praxis verwendet, um verschiedene Wahrscheinlichkeiten bzw. Raten anzugeben. Dabei ist wichtig, sich jeweils klar zu machen, auf welchen Fall sich der Begriff bezieht. Die "Spezifität" z.B. kann entweder in obiger Tabelle den richtig-negativ Wert oder aber den richtig-positiv Wert angeben. Der Zusammenhang entscheidet also oftmals hinsichtlich der Definition.

Wenn ein Bildverarbeitungssystem zur Prüfung von Eigenschaften von Objekten eingesetzt werden soll dann sind in der Regel klare Vorgaben hinsichtlich der Sicherstellung dieser Prüfung notwendig. Das BV-System ist in diesem Fall ein "Prüfmittel" und muss Anforderungen an die "Prüfmittelfähigkeit" erfüllen. Letztlich bedeutet das, dass die messenden Systembestandteile sinnvoll und regelmäßig kalibriert sind und klar ist (vgl. Rückführbarkeit), wie die wesentlichen Parameter (z.B. Messunsicherheit) sind.

Der Nachweis der Prüfmittelfähigkeit ist insbesondere in der Automobilindustrie weit verbreitet. Was jeweils konkret wie nachgewiesen werden muss variiert von Anwendung zu Anwendung und Hersteller zu Hersteller. Letztlich muss sich das BV-System also an den Forderungen des Auftraggebers orientieren. Aufgrund der Vielfalt an Anwendungen der industriellen Bildverarbeitung ist es wenig sinnvoll, allgemeine Richtlinien zur konkreten Definition des Nachweis der Prüfmittelfähigkeit anzugeben.

11.3 Spezifikation von Defekten

Letztlich kann alles, was in irgendeiner Form zu einem Objekt gehört fehlerhaft sein. Es besteht also eine immense Vielfalt an Eigenschaften, die von Bildverarbeitungssystemen geprüft werden müssen. Dennoch sind in vielen Fällen die selben Merkmale entscheidend und daher existieren für wesentliche praxisrelevante Prüfmerkmale verschiedene Normen.

Von besonderer Bedeutung ist die sogenannte “Geometrische Produktspezifikation” (GPS) nach EN ISO 25178 und EN ISO 8785, die sehr ausführlich auf verschiedene Aspekte der Definition geometrischer Spezifikationen von Objekten und ihrer Fehler eingeht. Wichtige Grundgrößen sind

- Maße
- Abstände
- Radian
- Winkel und Richtungen
- Formen
- Profile
- Oberflächenunvollkommenheiten
- Oberflächenbeschaffenheiten
- Mikrostrukturen (u.a. Rauheit)

Oberflächenunvollkommenheiten sind für die optische Prüfung natürlich von besonderem Interesse, denn direkt kann ein optischer Zugriff nur auf Oberflächenmerkmale erfolgen.

Entscheidend sind Länge, Breite, und Höhe/Tiefe der jeweiligen Oberflächenunvollkommenheit sowie die Anzahl entsprechender Defekte. Teilweise kann es auch relevant sein, wie die Defekte auf die zu prüfende Oberfläche verteilt sind (z.B. Porennetz). Direkt abgeleitet sind die Fläche und das Volumen des Defekts.

Wie wollen nicht auf die einzelnen spezifizierten Defekte (z.B. Riefe, Kratzer, Lunker, Riß, Beule usw.) eingehen. In der Regel kennt der Auftraggeber geeignete Defektmodelle bzw. Beschreibungen der für ihn relevanten Defekte.

Literaturverzeichnis

- [1] W.J. Smith: "Modern Optical Engineering", SPIE Press
- [2] Melles Griot Technical Guide, cvimellesgriot.com
- [3] R.E. Fisher, B. Tadic-Galeb, P.R. Yoder: "Optical System Design", SPIE Press
- [4] M. Katz: Introduction to geometrical optics, World Scientific Pub 2003.
- [5] H. Gross: "Handbook of optical systems", Vol. 1 Fundamentals of Technical Optics, Wiley 2005.
- [6] H. Gross: "Handbook of optical systems", Vol. 2 Wiley
- [7] H. Gross: "Handbook of optical systems", Vol. 3 Wiley
- [8] D. Kühlke: Optik: Grundlagen und Anwendung, Verlag Harri Deutsch
- [9] G. Schröder, H. Treiber: Technische Optik: Grundlagen und Anwendung, Vogel Verlag
- [10] J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", Wiley
- [11] W. Bachmann: Signalanalyse: Grundlagen und mathematische Verfahren
- [12] R. D. Fiete: Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras (SPIE Tutorial Text Vol. TT92), SPIE Press
- [13] V.R Bhakta: Applications of the phase transfer function, Applied Optics 51, A17, 2012
- [14] Melles Griot Technical Guides, cvimellesgriot.com
- [15] ???
- [16] J.R. Rogers: Three-bar resolution versus MTF: how different can they be anyway?, Proc. SPIE 7071, 707109, 2008.

[17] ???

[18] ???

[19] E. Kubacko, The direct on cleaning optics, Photonic Spectra 3/2006

[20] M. Zöllfel, Das saubere Mikroskop, C.Z. Microimaging, via Google als PDF.

[21] V. R. Arrechi, T. Messadi, R.J. Koschel: Field Guide to illumination, SPIE Press

[22] A. Hornberg: Handbook of Machine Vision, Wiley

[23] H. Beyer: Handbuch der Mikroskopie, 1974

[24] ???

[25] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, DIN ENV 13005.