



ifm electronic

**Optimierung und Lösung  
von technischen Abläufen  
durch Sensorik, Kommunikations-  
und Steuerungssysteme**

**Schulungsunterlagen**

**efector 250<sup>®</sup>**

**Optische Grundlagen der Bildverarbeitung**

Schulungsunterlagen Optische Grundlagen der Bildverarbeitung, V1.5

Hinweis zur Gewährleistung:

Sämtliche auf diesem Datenträger veröffentlichten Daten sind geistiges Eigentum der ifm bzw. wurden uns teilweise von Kunden oder Lieferanten zur exklusiven Nutzung überlassen. Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass jedwede Verwertung (insbesondere Vervielfältigung, Verbreitung und Ausstellung) sowie Bearbeitung oder Umgestaltung nur nach vorheriger schriftlicher Zustimmung durch ifm zulässig ist.

Diese Schulungsunterlagen wurden unter Beachtung der größtmöglichen Sorgfalt erstellt. Gleichwohl kann keine Garantie für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhalts übernommen werden.

Da sich Fehler trotz intensiver Bemühungen nie vollständig vermeiden lassen, sind wir für Hinweise jederzeit dankbar.

ifm electronic gmbh, Abteilung VTD-STV, Teichstr. 4, 45127 Essen, Tel.: 0201/2422-0,

Internet: [www.ifm.com](http://www.ifm.com)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Sensoren in industriellen Prozessen	4
1.2	Eingrenzung des Themas	5
<b>2</b>	<b>Optik</b>	<b>6</b>
2.1	Erzeugung eines Bildes	6
2.1.1	Bildpunkte	6
2.1.2	Verarbeitung	10
2.2	Abbildungsfehler	10
2.2.1	Schärfe und Auflösung	10
2.2.2	Schärfe und Entfernung	12
2.2.3	Bildfeld	15
2.2.4	Auflösung auf dem Chip	16
2.2.5	Weitere Abbildungsfehler	17
2.3	Perspektive	21
<b>3</b>	<b>Eigenschaften des Kontursensors</b>	<b>26</b>
3.1	Schärfe beim efector dualis	26
3.2	Auflösung beim efector dualis	27
3.3	Bildfeld	28
3.4	Weitere Hinweise	29

# 1 Einleitung

## 1.1 Sensoren in industriellen Prozessen

wozu?

In automatisierten Produktionsabläufen ist der Einsatz von Sensoren als Informationsgeber Voraussetzung. Sie senden die notwendigen Signale über Positionen, Endlagen, Füllstände, oder dienen als Impulsgeber. Ohne zuverlässig arbeitende Sensoren ist die beste Steuerung nicht in der Lage, Prozesse zu kontrollieren.

Man unterscheidet allgemein zwischen sogenannten binären Sensoren, die ein eindeutiges High-Low Signal schalten, und sogenannten analogen Sensoren, die vorzugsweise in der Messtechnik zur Temperatur-, Weg-, Druck-, Kraftmessung usw. eingesetzt werden. Hierbei gibt der Sensor ein analoges Signal ab, welches zur Messung und Regelung weiter ausgewertet wird.

Generell bestehen all diese Sensoren aus zwei Komponenten: Die erste registriert die Änderung physikalischer Zustände (Elementarsensor), die zweite setzt die Signale des Elementarsensors in elektrische Ausgangssignale um (Signalverarbeitung).

Sensor

Die Abbildung zeigt das allgemeine Schema, das im Prinzip auf jeden Sensor zutrifft. Unterschiede gibt es nur im Detail, z. B. wenn einzelne Komponenten nicht vorkommen oder nicht zu trennen sind. Manchmal wird auch der Elementarsensor kurz als Sensor bezeichnet. Dann muss auf den Zusammenhang geachtet werden, ob das ganze Gerät oder der Elementarsensor gemeint ist. Manche Geräte bestehen auch aus getrennten Komponenten, z. B. ATEX-Geräte (NAMUR-Sensoren) oder häufig auch Temperatursensoren. Hier wird der Messwertaufnehmer an eine separate Auswerte- oder Verstärkereinheit angeschlossen.

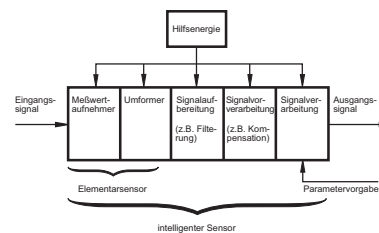


Abbildung 1: Struktur eines Sensors

optoelektronische Sensoren

Diese Art von Sensoren wird seit langem zur Positionserkennung eingesetzt. Dabei werden sie häufig als Lichtschranken bezeichnet. Genau genommen gehört der Lichttaster auch in diese Kategorie, siehe [Schulungsunterlagen optoelektronische Sensoren](#). Das sind binäre Sensoren, die wie z. B. [induktive Näherungsschalter](#) die Information liefern: "Objekt vorhanden" oder "Objekt nicht vorhanden". In speziellen Anwendungen, bei denen Kombinationen mehrerer Sensoren verwendet werden, können sie auch zur Messung z. B. von Längen oder Geschwindigkeiten eingesetzt werden. Dabei findet die Signalverarbeitung aber nicht im Sensor sondern in der nachgeschalteten Steuerung statt.

efector pmd Die ifm electronic bietet einen speziellen, neuartigen optoelektronischen Sensor an, der zur Messung von Entfernungen eingesetzt wird. Hier geschieht die Datenverarbeitung im Sensor direkt. Weitere Einzelheiten dazu sind auch in unseren [Schulungsunterlagen](#) zu finden.

efector dualis Wegen des Einsatzes dieses Geräts zur Konturerkennung gehört er zur Gruppe der bilderzeugenden und -verarbeitenden Sensoren. Diese sind im täglichen Leben schon bei der Digitalkamera jedem geläufig. In der industriellen Praxis gibt es z. B. auch schon Systeme, die Objekte unabhängig von ihrer Lage (liegend, stehend, gedreht usw.) identifizieren können. Die Algorithmen, die dazu eingesetzt werden, erfordern eine erhebliche Rechenleistung. Das machte solche Systeme in der Vergangenheit aufwendig, langsam und teuer. Da die Prozessoren mit jeder neuen Generation leistungsfähiger und kompakter werden, verliert diese Einschränkung an Gewicht. Beim efector dualis ist es gelungen, die komplette Verarbeitung der Bildinformationen zusammen mit dem Sensor in einem relativ kleinen und kompakten Gerät zu integrieren. In der Anwendung kann man sich darauf beschränken, die binäre Information "Kontur korrekt" oder "Kontur nicht korrekt" abzufragen. Da das Gebiet Bilderzeugung und -verarbeitung schon recht komplex ist, wird im folgenden Kapitel noch etwas detaillierter beschrieben, worum es in diesem Handbuch geht.

## 1.2 Eingrenzung des Themas

Schwerpunkt Optik Hier werden ausführlich die optischen Grundlagen erläutert. Diese gelten natürlich für jedes System, Sensor oder z. B. Kamera. Kenntnisse und Erfahrungen in der Fotografie sind hier von Vorteil. Die Software, die im Sensor bei der Aufbereitung der Bilddaten eingesetzt wird, ist ein Thema für sich und wird hier nicht weiter behandelt. Es gibt dazu Fachliteratur. Als Stichwort soll nur "blob" genannt werden.

Bedeutung des Themas Das Thema industrielle Bildverarbeitung gewinnt immer mehr an Bedeutung. Die binären optoelektronischen Sensoren gibt es schon einige Zeit. Sie sind daher ausgereift, werden natürlich auch weiterentwickelt, sicherer in der Anwendung, die Bauformen schrumpfen usw. Es gibt aber Aufgaben, die sie nicht ohne weiteres lösen können. Dazu gehören z. B. Messaufgaben. Es geht dabei um absolute Messungen, z. B. der Entfernung (siehe pmd-Sensor) oder auch um die Kontrolle der Maßhaltigkeit bei wechselnden Formen diverser Objekte. Dazu lässt sich ein Kontursensor einsetzen.

bildgebender Sensor Bei einem solchen Kontursensor werden bildgebende Verfahren eingesetzt. Er ist vergleichbar mit einer elektronischen Kamera. Hier soll vorausgesetzt werden, dass im Prinzip bekannt ist, wie diese funktioniert. Das Licht, das vom Objekt kommt, wird von einem optischen System auf einen flächenförmigen (2d) Empfängerchip geleitet. Dessen Fläche ist in eine bestimmte Anzahl von Elementen, Pixeln genannt, aufgeteilt. Neben der Optik bestimmt die Anzahl und Zuverlässigkeit der Pixel die Qualität des Bildes. Die Information, wie viel Licht (heute in der Regel auch Farbinformationen) auf jedes Pixel fällt, wird in der Kamera ausgewertet und aufbereitet, so dass ein Bild daraus entsteht. Besonders bei Messaufgaben oder der Erkennung von Konturen werden hohe Anforderungen an die Rechenleistung bei der Aufbereitung der Bildinformationen gestellt. Für den wirtschaftlichen Einsatz solcher Sensoren gibt es also zwei Voraussetzungen:

- es gibt genügend Empfängerchips mit hinreichender Qualität, z. B. mit genügend vielen Pixeln, gute Empfindlichkeit, kurze Zeiten usw.
- die Aufbereitung der Daten, die nicht mit einer Bildverarbeitung am PC sondern direkt im Sensor geschieht, erfordert eine enorme Rechenleistung im Sensor. Ein solcher Sensor in seiner kompakten Bauform stellt damit einen PC, wie er z. B. 1990 üblich war, weit in den Schatten. Für die Anwendung ist ja nur das Ergebnis, die (binäre) Information wichtig: der Prüfling erfüllt die Anforderungen bezüglich der Maße.

was ist ein Pixel?

Schließlich soll noch darauf hingewiesen werden, dass in manchen Zusammenhängen auch der Begriff Pixel im Sinne von Bildpunkt verwendet wird, z. B. bei einem Monitor. In diesem Text soll Pixel immer das Element eines Empfängerchips bedeuten.

Begriffe aus der Optik

Hier soll es aber nicht um Details dieser Berechnungen gehen. Man kann den Sensor als "black box" sehen. Von außen hat man auch keinen Zugriff darauf. Man kann aber diverse Parameter einstellen. Dabei werden Begriffe, wie z. B. Kontrast, verwendet, die man in der Optik, bzw. in der Fotografie verwendet. Wer sich schon einmal intensiver mit Fotografie beschäftigt hat, dem fällt hier das Verständnis leichter.

Im folgenden Text sollen speziell diese optischen Begriffe erläutert werden, auf die man immer wieder trifft, wenn man sich mit dem Thema Bildverarbeitung beschäftigt. Damit soll die Beantwortung der folgenden Fragen erleichtert werden.

Verständnisfragen

- Welche Eigenschaften werden benötigt, wenn Maße oder Konturen ermittelt werden sollen?
- Was versteht man unter "Qualität des Bildes"?
- Um einen Begriff schon vorweg zu nehmen, was bedeutet "Schärfe" (das bezieht sich nicht auf das Motiv!)?

Dieser und etliche andere Begriffe sollten bekannt sein, wenn man hier mitreden möchte.

## 2 Optik

### 2.1 Erzeugung eines Bildes

Kurze Übersicht zur "elementaren" Optik.

#### 2.1.1 Bildpunkte

dünne Linse

Um die Grundlagen und die Begriffe besser zu verstehen, wird zunächst auf den Idealfall eingegangen. Er wird auch mit dem Begriff "dünne Linse" bezeichnet. Weiter unten wird dann im zweiten Schritt die Realität beschrieben, in der z. B. Abbildungsfehler vorkommen.

Ein Bild wird meistens durch eine Linse erzeugt. Die Entstehung des Bildes kann man sich durch folgende Regeln veranschaulichen:

Regel 1.1

Strahlen, die parallel zur Achse einfallen, verlaufen durch einen Punkt, den Brennpunkt.

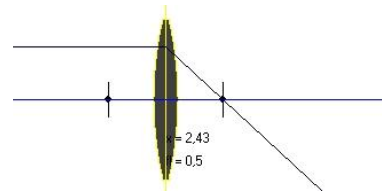


Abbildung 2: Achsenparalleler Strahl

Sammellinse

Diese Regel gilt natürlich für alle achsenparallelen Strahlen. Dadurch erklärt sich auch die Bezeichnung Sammellinse für konvexe (positiv gekrümmte) Linsen. Die Bedeutung des Begriffs Brennpunkt hat sich jeder schon einmal klar gemacht, der mit einem Vergrößerungsglas (das ist eine Sammellinse) Sonnenstrahlen auf einen Punkt konzentriert hat.

**Vorsicht!**

Auf keinen Fall sollte durch eine Linse (oder eine Kombination davon, z. B. im Fernrohr) direkt in die Sonne geblickt werden. Das Auge wird dadurch irreparabel geschädigt.

Genau genommen kann die Strahlung nicht auf einen Punkt konzentriert werden. Das Bild der Sonne ergibt eine Scheibe, weil die Sonne eben nicht punktförmig ist.

Laser

Ein Laser als Lichtquelle ist ebenfalls gefährlich, auch wenn die Strahlungsleistung geringer ist. Da die Strahlen recht gut parallel laufen, können sie durch eine Linse sehr gut auf einen Punkt konzentriert werden. In diesem ist dann die Leistungsdichte so groß, dass das Auge geschädigt werden. Dazu ist nicht einmal ein Vergrößerungsglas notwendig, weil sich im Auge selbst eine Linse befindet.

Die Sonnenstrahlung, die durch ein Brennglas geht, ist nicht nur für das Auge gefährlich. Fällt der Brennpunkt auf die Haut, dann entstehen Verbrennungen.

Papier oder Holz können auf diese Weise entzündet werden. Es besteht Brandgefahr! Auf diese Weise können sogar Scherben von weggeworfenen Flaschen Waldbrände erzeugen, falls sie Linsenform haben und die Sonne in entsprechender Richtung darauf scheint.

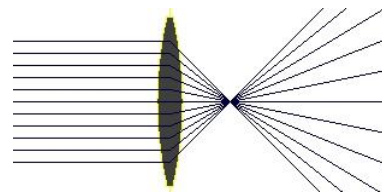


Abbildung 3: Bündelung

Brennweite

Der Abstand des Brennpunkts vom Zentrum der Linse heißt Brennweite  $f$  (von Fokus). Diese hängt von der Krümmung der Linse ab.

Regel 1.2

Strahlen, die durch das Zentrum der Linse laufen, werden nicht abgelenkt.

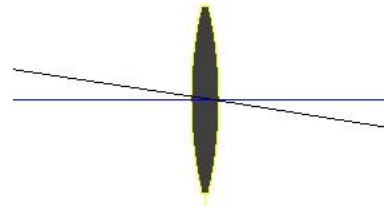


Abbildung 4: Zentrumsstrahl

Regel 1.3

Strahlen, die durch den Brennpunkt einfallen, werden parallel zur Achse abgelenkt.

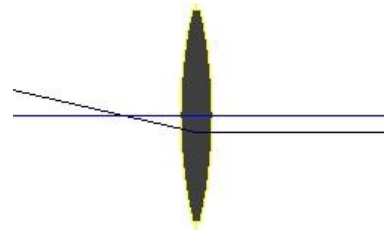


Abbildung 5: Strahl durch den Brennpunkt

Regel 1.3 folgt aus Regel 1.1, wenn man berücksichtigt, dass der Lichtweg immer umkehrbar ist.

Mit diesen Regeln kann das Bild eines Objektes konstruiert werden.

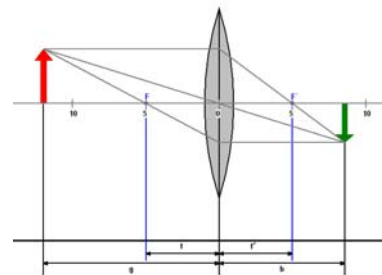


Abbildung 6: Erzeugung eines Bildes

In Abbildung 6 wird die Entstehung des Bildes der Pfeilspitze gezeigt. Die Regel seiner Konstruktion kann man dieser Abbildung entnehmen.

Regel 2

Der Bildpunkt eines Objektpunktes wird mit folgenden Hilfslinien konstruiert (nach Regel 1).

- Der achsenparallele Strahl (Abbildung 2) verläuft durch den Brennpunkt.
- Der Strahl durch das Zentrum (Abbildung 4) verläuft als gerade Linie.
- Der Strahl durch den Brennpunkt (Abbildung 5) erzeugt einen achsenparallelen Strahl.
- Alle drei treffen sich im Bildpunkt.

Eigentlich genügen zwei Hilfslinien, weil ja auch zwei Geraden einen Schnittpunkt haben. Die dritte ist eher eine zusätzliche Kontrolle.

komplettes Bild

Bis hier wurde nur die Entstehung eines Bildpunkts von einem Objektpunkt beschrieben. Um das ganze Bild des Objekts zu erzeugen, müsste jeder Bildpunkt nach der gleichen Regel erzeugt werden. Dabei wurde stillschweigend die folgende Regel benutzt.

Regel 3

Von jedem Objekt gehen Lichtstrahlen aus. Man kann sich das Objekt aus Punkten zusammengesetzt denken. Jeder Punkt sendet Lichtstrahlen in alle Richtungen aus (natürlich nur in den freien Raum).

Man kann dann aus den unendlich vielen Strahlen, die von jedem Punkt ausgehen, diejenigen aussuchen, die man für die Konstruktion des Bildes braucht.

In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass in diesem Fall die Erzeugung der Bildpunkte der Ecken des Pfeils genügt, um das komplette Bild zu konstruieren. Bei komplexeren Objekten wäre diese Methode sehr aufwendig. Man kann sich auf andere Weise klar machen, wie das Bild aussieht. Das wird hier nur kurz zusammengefasst erläutert. Mehr Details werden nicht benötigt.

Das Bild steht (in diesem Fall) im Vergleich zum Objekt auf dem Kopf und ist seitenverkehrt.

Hier sollen nicht ausführliche Berechnungen gezeigt werden. Der Vollständigkeit halber werden die Gleichungen hier nur angegeben und nicht im einzelnen diskutiert.

Zwischen Bildabstand  $b$ , Objektabstand  $g$  und der Brennweite  $f$  (siehe Abbildung 6) besteht folgender Zusammenhang:

$$(1) \quad \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$g$  [m]: Gegenstandsweite (auch Dingweite, Objektabstand);  $b$  [m]: Bildweite (Bildabstand);  $f$  [m]: Brennweite

(1) wird auch als Linsengleichung bezeichnet. Es soll daran erinnert werden, dass die Gleichung nur für dünne Linsen gilt. Bei realen Linsen und erst recht bei Systemen von Linsen, die verwendet werden um Abbildungsfehler (siehe 2.2) zu reduzieren, sind die Zusammenhänge komplizierter (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 21).

Bildgröße

Die Größe des Bildes ist, bezogen auf das Objekt, um einen festen Faktor verändert, vergrößert oder verkleinert. Dieser Faktor wird als Maßstabsfaktor bezeichnet. (2) wird auch als Abbildungsgesetz bezeichnet.

$$(2) \quad M = \frac{l_b}{l_g} = \frac{b}{g} = \frac{f}{g-f} = \frac{b-f}{f}$$

$l_b$  [m]: Bildgröße;  $l_g$  [m]: Objektgröße;  $b$  [m]: Bildweite;  $g$  [m]: Gegenstandsweite;  $f$  [m]: Brennweite

M

Diese Bezeichnung wird verwendet, weil der Begriff Vergrößerung, z. B. beim Mikroskop oder Fernrohr, eine unterschiedliche Bedeutung hat. Das ist der Faktor, um den sich der Sehwinkel verändert, unter dem das Objekt erscheint (genauer gesagt, dessen virtuelles Bild, darauf wird hier nicht weiter eingegangen).

Die Konsequenzen aus diesen Zusammenhängen werden deutlicher, wenn der Begriff "scharf stellen" diskutiert wurde, siehe 2.2.2.

## 2.1.2 Verarbeitung

Was ist die praktische Bedeutung?

Das Thema heißt ja Bildverarbeitung. Wie kann also dieses Bild verarbeitet werden?

Beispiel 1

Im Auge entsteht das Bild auf der Netzhaut. Dort werden die Informationen, z. B. über Farbe, Helligkeit usw., aufgenommen und als Nervenimpulse weitergeleitet. In unserem organischen Rechner (im Hirn) wird diese Information aufbereitet. Z. B. entsteht der Eindruck, das Bild sei gedreht, es steht also nicht auf dem Kopf.

Für den, der sich für diese Aufbereitung näher interessiert, soll hier kurz ein Experiment beschrieben werden. Setzt man eine Spezialbrille auf mit der Eigenschaft, dass das Bild auf dem Kopf steht, kommt einem das zunächst natürlich sehr ungewohnt vor. Man bekommt Probleme mit der Orientierung und dem Gleichgewicht. Nach einiger Zeit (das kann Tage dauern) hat sich aber die Bildverarbeitung soweit angepasst, dass alles wieder "richtig herum" erscheint. Nimmt man die Brille wieder ab, dann scheint jetzt die Welt auf dem Kopf zu stehen. Die Bildverarbeitung muss sich erneut anpassen. Das zeigt, dass die Erzeugung des Bildes nur der erste Schritt ist, es kommt wesentlich auf seine Verarbeitung an.

Beispiel 2

Das Bild entsteht auf einem fotografischen Film. Durch die Entwicklung und Fixierung wird es dauerhaft haltbar gemacht. Es steht auch auf dem Kopf. Das macht aber nichts, man kann es ja einfach herumdrehen. Dann bleibt es aber immer noch seitenverkehrt, wie man erkennt, wenn man ein Negativ oder ein Dia ansieht. Bei der Vergrößerung für einen Abzug auf Papier oder bei der Projektion eines Dias wird das wieder korrigiert. Jeder, der schon einmal Dias projiziert hat, kennt den Effekt, der sich ergibt, wenn das Dia falsch eingelegt wurde.

Beispiel 3

Das Bild entsteht auf dem Chip einer elektronischen Kamera. Es sieht genauso aus, wie in Beispiel 1 oder 2. Durch die elektronische Verarbeitung wird, ähnlich wie in Beispiel 1 wieder ein aufrechtes und seitenrichtiges Bild erzeugt.

Für die Qualität eines Bildes sind die Auflösung und die Schärfe maßgebend. Diese Begriffe müssen also genauer betrachtet werden. Das soll im nächsten Abschnitt geschehen

## 2.2 Abbildungsfehler

### 2.2.1 Schärfe und Auflösung

Begriffe

Zuerst soll diskutiert werden, was man (im technischen Sinne) darunter versteht. Es mag überraschend sein, dass es gar keine eindeutige Definition dafür gibt. Eine gute Darstellung der Zusammenhänge findet man bei <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>. Hier folgen Auszüge daraus.

Ein grundlegendes Problem ... ist es, eine objektiv messbare Grösse für den subjektiven Eindruck "Schärfe" zu finden. Dieser setzt sich nämlich aus der Kantenschärfe und dem Kontrast zusammen: In der folgenden Abbildung sind die oberen Kanten scharf, die unteren unscharf. Links ist der Kontrast höher als rechts. Der subjektive Schärfeeindruck ist links oben am höchsten, rechts unten am niedrigsten.

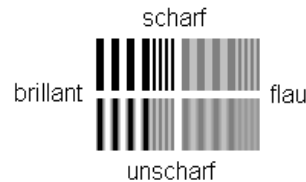


Abbildung 7: Schärfe

Oft wird Schärfe gleichbedeutend mit Auflösung verwendet. Dazu ein Auszug aus

[http://de.wikipedia.org/wiki/Aufl%C3%B6sung\\_%28Fotografie%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Aufl%C3%B6sung_%28Fotografie%29).

Zur Ermittlung des Auflösungsvermögens werden Testaufnahmen von Strichmustern angefertigt. Dazu wird auf den Film ein Strichraster mit zunehmender Ortsfrequenz (in Linien pro Millimeter bzw. Perioden pro Millimeter) und abgestimmter Intensität aufbelichtet und mit einem Mikrodensitometer überprüft, wie stark der Modulationsgrad der Abbildung mit zunehmender Ortsfrequenz prozentual abnimmt. Die Gitterkonstante eines solchen Strichmusters ist nicht konstant, sondern verändert sich kontinuierlich.

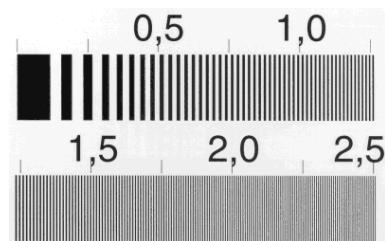


Abbildung 8: Auflösung

Früher mass man zur Quantifizierung der Schärfeleistung das **Auflösungsvermögen**: Durch Abbilden schwarzweisser Linienmuster verschiedener Grösse (Siemensstern, Balkenmiren) wurde ausgelotet, wie viel Linien (eigentlich Linienpaare, schwarz und weiss) noch abgebildet (aufgelöst) werden konnten und ab wann sich eine einheitlich graue Fläche ergab. Das Ergebnis ist die maximale Auflösungsfähigkeit des Objektivs in Linienpaaren pro Millimeter (Lp/mm), in Abhängigkeit von der Lage im Bild (Mitte oder Ecke) und der Blende. Im praktischen Einsatz haben derartige hohe Kontraste jedoch eine untergeordnete Bedeutung. Der subjektive Schärfeeindruck der Bilder eines Objektivs, welches geringer auflöst, dafür aber kontrastreicher abbildet, kann bei vielen Betrachtern höher sein.

Kurz gesagt ist das Auflösungsvermögen messbar. Schärfe ist dagegen ein subjektiver Eindruck. Ein scheinbar paradoxes Ergebnis ist, dass ein Bild mit hoher Auflösung flau und damit unscharf wirken kann. Ein Bild mit hohen Kontrasten kann weniger hoch aufgelöst sein aber trotzdem schärfer wirken. Der Zusammenhang mit der Größe der Pixel auf dem Chip wird weiter unten beschrieben, siehe Abbildung 13.

### 2.2.2 Schärfe und Entfernung

Was heißt scharf stellen?

Dieser Vorgang wird auch als fokussieren bezeichnet. Weil die Schärfe eine wesentliche Komponente der Bildqualität darstellt wird das im folgenden etwas ausführlicher erläutert.

Der Zusammenhang wird an einer vereinfachten Version von Abbildung 6 deutlich gemacht. In Abbildung 9 befindet sich der Bildpunkt an der mit "1" markierten Stelle. Dieser Abstand ist also optimal für die Bildebene. In der Bildebene kann man sich den Film oder den Empfängerchip vorstellen.

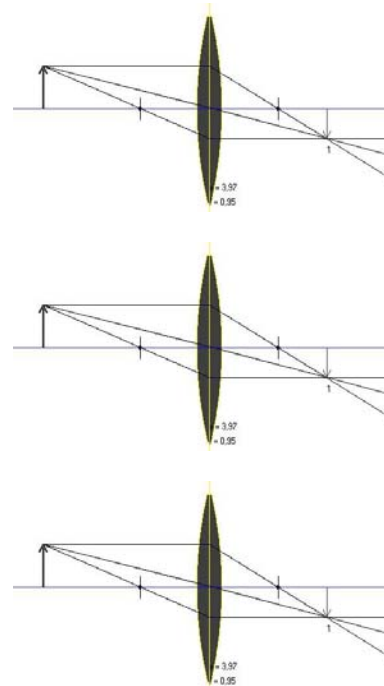


Abbildung 9: Schärfe und Entfernung

Filmebene

Egal, ob es sich um einen konventionellen Film oder eine elektronische Kamera handelt, soll die Lage des Filmes oder Empfängerchips als Filmebene bezeichnet werden. Optimal wäre es also, wenn die Filmebene und die Bildebene zusammenfallen. In der Praxis wird es jedoch Abweichungen, nach hinten oder nach vorne, geben. Statt eines Punktes ergibt sich dann eine Scheibe.

Ist dieses Bild unscharf?

Wie so häufig kann man auch diese Frage nur so beantworten: das kommt darauf an. Wir müssen die Frage genauer fassen: wann wirkt das Bild unscharf?

Die Antwort liefert das Auflösungsvermögen des Auges. Wenn man die drei Fälle in Abbildung 9 nicht unterscheiden kann, dann erscheinen die drei Bilder gleich scharf. Hier sollen jetzt keine Berechnungen zu den Grenzwerten folgen. Es soll genügen, wenn das Prinzip verstanden ist.

In der Praxis wird aber selten die Filmebene verstellt. In den meisten gängigen Kameras wird die Linse verschoben.

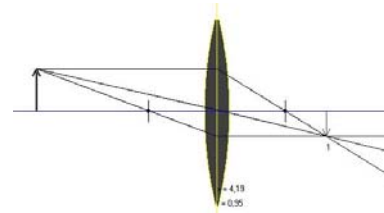


Abbildung 10: Scharf stellen

Die nicht optimale Einstellung der Schärfe in Abbildung 9 Mitte und unten lässt sich also durch Verschiebung der Linse verbessern.

Bildgröße	Vergleicht man die Abbildung 9 mit Abbildung 10 und sieht genau hin, dann erkennt man, dass sich die Bildgröße geändert hat.
Größenverhältnis	Eine wichtige Konsequenz für die Praxis ist, dass man kein festes Verhältnis zwischen Bildgröße und Objektgröße hat. Zur Vermessung oder z. B. zur Dokumentation von Verkehrsunfällen wird unbedingt ein Vergleichsmaßstab benötigt, um die tatsächlichen Größenverhältnisse zu ermitteln. Nur im Spezialfall bleibt die Größe gleich, siehe 2.3 .
Autofokus	Nur noch bei wenigen Kameras wird die Entfernung manuell eingestellt. Genauer gesagt, entspricht der Entfernung die Position der Linse, bei der die Bildebene in der Filmebene liegt. Die meisten Kameras haben einen Autofokus, eine automatische Entfernungseinstellung. Dabei gibt es verschiedene Methoden. Eine davon kann jetzt leicht verstanden werden. In Abbildung 7 erkennt man, dass der Kontrast maximal ist bei einer optimal scharfen Einstellung. Das Bild wird zur Ermittlung des Kontrasts elektronisch ausgewertet. Da das mehrmals geschehen muss, um die optimale Stellung zu finden, können solche Systeme relativ langsam sein.
Grenzen	Durch die mechanische Konstruktion ist speziell die untere Grenze der Scharfeinstellung vorgegeben. Die obere Grenze ist bei Fotoapparaten $\infty$ .
Auge	Beim menschlichen Auge wird durch das Verändern der Brennweite, analog zum Zoomobjektiv, scharfgestellt. Sehfehler müssen dann durch Brillen oder Kontaktlinsen kompensiert werden. Hier sind überhaupt die Verhältnisse etwas komplexer. Es gibt einen Bereich mit maximaler Auflösung im Zentrum des Sehfeldes. Objekte am Rand werden weniger gut aufgelöst, sind also weniger scharf. Durch die Aufbereitung der Information im Hirn werden aber auch Fehler kompensiert. Z. B. der sogenannte "blinde Fleck", der Austritt des Sehnervs ist nicht lichtempfindlich. Diese "Lücke" im Bild wird aber normalerweise nicht wahrgenommen.
dünne Linse	Die folgende Überlegung gilt genau nur im Idealfall "dünne Linse", siehe oben. Die praktischen Abweichungen davon sind für diese Überlegung aber weniger wichtig, so dass sie, mit leichten Einschränkungen, auch für reale optische Systeme gilt.
Schärfenebene	Genau genommen interessiert die optimale Schärfe nur in einer Ebene. Das bedeutet auch, dass die Objekte in einer Ebene optimal scharf abgebildet werden sollen.



Beugungsunschärfe	Das Abblenden ist begrenzt durch die Beugungsunschärfe. Wird die Differenz zwischen Durchmesser der Blende und Wellenlänge immer geringer, dann ist dieser Effekt zu berücksichtigen. Ein Beispiel:
Beugungsscheibe	Eine Kleinbildkamera mit einer Blende von $f / D = 2.4$ erzeugt ein Beugungsscheibchen von ca. $2 \mu\text{m}$ Durchmesser. Es ist auf einem Negativfilm fast nicht mehr auflösbar (F Brennweite, D Durchmesser). Bei Blende 22 ergibt sich schon ca. $20 \mu\text{m}$ .
<b>2.2.3 Bildfeld</b>	
In der Praxis, speziell beim efector dualis, ist der Abstand zwischen dem Objekt und dessen Bild (auf dem Chip) fest vorgegeben.	
Dann muss der Abstand der Optik (des Linsensystems) so eingestellt werden, dass sich ein scharfes Bild ergibt, siehe 2.2.2. Dort wurde auch schon darauf hingewiesen, dass die Größe des Bildes, d. h. der Maßstabsfaktor, siehe Gleichung (2), von der Entfernung abhängt.	
Grenzen des Abstands	Der Abstand, in dem ein Objekt scharf gestellt werden kann ist durch den Bereich der mechanischen Verstellung der Optik begrenzt. Die untere Grenze liegt für die meisten Typen bei 30 mm, bei einigen bei 40 mm. Die obere Grenze ist hier durch die Helligkeit der Beleuchtung gegeben. Sie liegt bei 400 mm.
Grenzen der Größe	Die maximalen Abmessungen eines Objekts sind durch die Größe des Chips begrenzt. Denkt man sich den Lichtweg umgekehrt (das ist in der geometrischen Optik immer möglich), dann entspricht der Fläche des Chips eine Fläche im zulässigen Entfernungsbereich. Diese Fläche wird auch Bildfeld oder hier auch Lesefeld genannt. Offenbar muss ein Objekt komplett im Bildfeld liegen, damit es erfasst werden kann. Da es umständlich wäre, für jede Entfernung die Größe des Bildfeldes zu berechnen, stehen in den Datenblättern Tabellen über die Bildfeldgröße.
Brennweite	Die bisherigen Aussagen sind allgemeiner Art, so dass sie für jede Brennweite gelten. Wenn die Größe des Chips und der Abstand des Objekts gegeben sind, dann bestimmen diese Angaben noch nicht die Größe des Bildfeldes. Dazu muss noch die Brennweite der Optik bekannt sein, vgl. Gleichung (1). Es gibt zur Zeit (siehe Seite 2) 3 Typen des Kontursensors efector dualis. Sie unterscheiden sich durch ihre Brennweite. Das "Teleobjektiv" unter ihnen hat das kleinste Bildfeld. Es lässt sich auch nicht auf 30 mm scharfstellen sondern erst auf 40 mm.. Diese Eigenschaft einer höheren Nahgrenze ist auch bei Teleobjektiven in der Fotografie bekannt.
Auswahl	Warum gibt es Geräte mit unterschiedlichem Bildfeld, d. h. mit unterschiedlicher Brennweite? Man könnte ja meinen, optimal ist das "Weitwinkelobjektiv", weil es das größte Bildfeld hat. Dann ist man völlig flexibel, man kann unterschiedliche Objekte, klein, groß, nah und fern erfassen. Dabei muss aber auch der Aspekt der Auflösung berücksichtigt werden. Dieser wird im nächsten Abschnitt genauer besprochen. Hier soll der Effekt nur kurz illustriert werden.

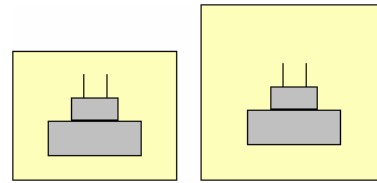


Abbildung 12: Objekt in unterschiedlichen Bildfeldern

Wenn man etwas darüber nachdenkt, dann kann man sich den Zusammenhang mit Abbildung 12 klarmachen. Durch das kleinere Bildfeld auf der linken Seite ist hier die Auflösung am besten. Je kleiner das Objekt im Vergleich zu den Abmessungen des Bildfeldes ist, desto schwieriger ist es, feine Details aufzulösen.

optimale Überdeckung

Es wird empfohlen, dass das Objekt, bzw. der relevante Konturbereich ca. 50 bis 70 % des Bildfeldes ausfüllt.

### 2.2.4 Auflösung auf dem Chip

Nehmen wir an, die Schärfe sei optimal eingestellt. Dann begrenzt die Größe der Pixel die Auflösung (Bei fotografischen Filmen ist das die Korngröße. Sie ist zur Zeit noch deutlich geringer als die Größe eines Pixel).

lpi

Anschaulich bedeutet das zu fragen, welche Objekte voneinander unterschieden werden können. Zum Testen verwendet man häufig parallele Linien. Während man bei Druckern misst, wieviele Punkte unterschieden werden können, gemessen in dpi (dots per inch), wird bei optischen Systemen die Auflösung auch in lpi (lines per inch) angegeben. Dieser Wert wird auch als Ortsfrequenz bezeichnet. Oben wurde der Zusammenhang mit der Schärfe erläutert (siehe Abbildung 8). Hier soll zunächst der Zusammenhang zwischen der Dichte der Pixel auf dem Empfängerchip und der Auflösung betrachtet werden. Dazu wird eine Reihe von Pixeln betrachtet, die senkrecht zum Bild der parallelen Linien stehen.

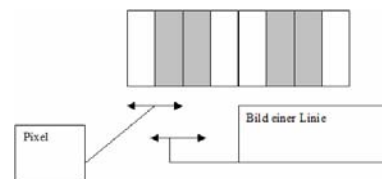


Abbildung 13: Auflösung auf dem Chip

Mindestbreite

Ist das Bild einer Linie gerade so breit wie ein Pixel und fallen die Bilder der Linien immer genau auf die Mitte zwischen zwei Pixeln, dann empfängt jedes Pixel die gleiche Lichtmenge. Damit können die Linien nicht voneinander unterschieden werden. Um sicher zu gehen, muss man also verlangen, dass das Bild einer Linie (und auch das Bild der Lücke zwischen zwei Linien) doppelt so breit ist, wie ein Pixel. Dann wird in jedem Fall ein Pixel total überdeckt. Die Linien können voneinander unterschieden werden.

Fläche eines Pixel

Pixel sind rechteckig oder quadratisch mit einer Fläche zwischen ca. 5 bis 20  $\mu\text{m}$ .

Bei Digitalkameras wird manchmal auch nur die Anzahl der Pixel als Auflösung bezeichnet, obwohl dieser Wert allein dafür nicht ausreicht.

Im folgenden Abschnitt werden weitere Einflüsse beschrieben, die die Qualität der Abbildung verringern können.

### 2.2.5 Weitere Abbildungsfehler

In der Realität treten weitere Fehler auf, die hier nur kurz beschrieben werden. Es sollte deutlich geworden sein, dass alle diese Einflüsse, die Funktion eines Sensors beeinträchtigen können, der z. B. die Maßhaltigkeit kontrolliert.

#### Sphärische Aberration und dicke Linsen

Das sind eigentlich verschiedene Effekte, die sich aber ähnlich auswirken. Die meisten Linsen sind Kugelabschnitte, in unseren Abbildungen, die Querschnitte darstellen, sind sie durch Kreisbögen begrenzt. Diese Form ist am leichtesten präzise zu fertigen. Mathematisch gesehen wäre aber die Parabelform ideal. Nur dann laufen die Strahlen exakt einem Punkt zusammen. Durch die Kreis- bzw. Kugelform werden die Strahlen am Rand stärker gebrochen.

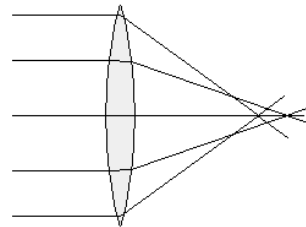


Abbildung 14: Sphärische Aberration

#### asphärisch

Hochwertige, teure Objektive kompensieren diesen Fehler durch asphärische (von der Kugelform abweichende) Linsen.

#### dicke Linsen

Außerdem sind reale Linsen nicht beliebig dünn. Schon eine einzelne Linse muss man sich ersetzt denken, durch ein System aus zwei Linsen, um den Strahlengang einigermaßen korrekt ermitteln zu können. Die Lage der Linsen wird durch die beiden Hauptebenen  $H$  und  $H'$ , siehe Abbildung 15 beschrieben. Hier wird nicht weiter darauf eingegangen. Das Ergebnis sieht aber ähnlich wie der Fall von Abbildung 14 aus.

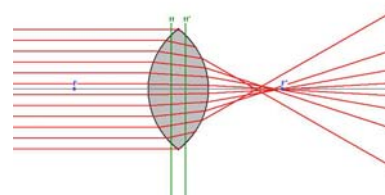


Abbildung 15: Dicke Linse

Diese Fehler können auch durch Abblenden reduziert werden.

chromatische Aberration

Die chromatische Aberration beruht darauf, dass Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich stark gebrochen wird. Bei einfarbiger Beleuchtung spielt sie keine Rolle. Sie kann aber für Störungen durch Fremdlicht von Bedeutung sein. Ein Mittel dagegen ist Filterung. Die meisten elektronischen Kameras sind mit einem IR(infrarot)-Sperrfilter ausgestattet, weil die Sensoren besonders anfällig für Störungen durch IR-Strahlungen sind. Filter können selbst aber auch wieder Abbildungsfehler verursachen, so dass im Einzelfall abzuwägen ist, ob ein Einsatz von Vorteil ist.

Bildfeldwölbung

bedeutet, dass die Bildpunkte genau genommen nicht auf einer Ebene sondern einer gewölbten Fläche liegen. Das führt dazu, dass z. B. auf einem ebenen Empfänger der Rand weniger scharf erscheint, falls die Bildmitte exakt scharf ist.

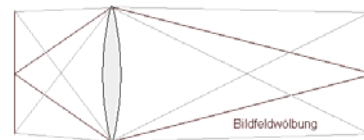
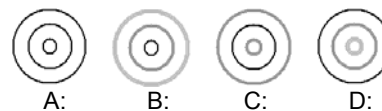


Abbildung 16: Bildfeldwölbung

Die Bildfeldwölbung führt dazu, dass ebene Objekte nicht überall gleich scharf abgebildet werden. Jetzt ist auch verständlich, was mit der Bezeichnung "Planar" für einen bekannten Objektivtypus ausgesagt werden soll. Die Wirkung soll an einem Beispiel illustriert werden. Dem Objekt befinden sich konzentrische Kreise. Der Effekt tritt natürlich auch z. B. bei einem Gitternetz auf.



A: Ohne Bildfeldwölbung; B: Scharfstellung auf inneren Kreis; C: Scharfstellung auf mittleren Kreis; D: Scharfstellung auf äußeren Kreis

Abbildung 17: Unschärfe durch Bildfeldwölbung

Verzeichnung

Die Verzeichnung tritt besonders bei Zoom- und Weitwinkelobjektiven auf. Dabei werden gerade Linien, die nicht durch das Zentrum verlaufen, gekrümmt abgebildet.

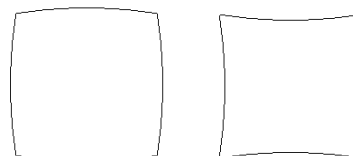


Abbildung 18: Tonnen- und kissenförmige Verzeichnung

Verzeichnung ist natürlich für Messungen besonders kritisch. Der Maßstab, d. h. die Vergrößerung bzw. Verkleinerung sind nicht konstant. Wenn nur kontrolliert werden soll, ob ein Objekt vorhanden ist, oder nur die Kontur kontrolliert werden soll, ist die Verzeichnung weniger kritisch. Dabei ist aber zu fordern, dass die Objekte immer in der gleichen Position aufgenommen werden. Befindet sich ein Objekt bei einer Aufnahme im Zentrum des Bildes und bei der nächsten Aufnahme am Rand, dann kann die Verzeichnung zu einer scheinbaren Abweichung von der "Idealform" führen.

Korrektur

Wenn es optisch zu aufwendig ist, die Verzeichnung zu korrigieren, dann kann man sie auch rechnerisch, bei der Aufbereitung der Bilddaten korrigieren.

Vignettierung

Damit wird die Abdunklung an den Bildrändern, speziell den Ecken bezeichnet. Es gibt dafür eine physikalische Ursache, die in der Praxis weniger bedeutend ist (Stichwort  $\cos^4\varphi$ -Gesetz). Mehr wirkt sich die Fassung der Linse, Sonnenblenden oder ähnliches aus, die bei schrägem Einfall das Licht begrenzen. Dadurch werden Kontrastunterschiede vorgetäuscht. Besonders anfällig für diesen Effekt sind Weitwinkelobjektive. Abblenden hilft auch hier.

Als weitere Fehler sollen noch Astigmatismus und Koma erwähnt werden.

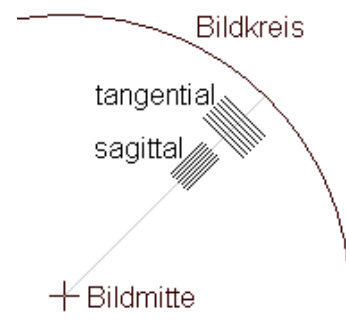


Abbildung 19: Zum Astigmatismus

Astigmatismus

entsteht durch Abweichungen der Symmetrie der Linse. Sie wirkt sich dadurch aus, dass tangentiale und sagittale Strukturen (siehe Abbildung 19) mit unterschiedlicher Qualität abgebildet werden. Ein Extremfall wäre eine zylindrische Linse, die nur in einer Dimension fokussierbar ist. Astigmatismus kann auch als Fehler beim menschlichen Auge auftreten. Er kann durch entsprechende Brillengläser kompensiert werden.

Koma

hat seinen Namen daher, dass das Bild einer Scheibe tropfenförmig verzerrt erscheint. Das Bild läuft in die Form einer Koma aus, ähnlich der Abbildung eines geschweiften Kometen. Der Effekt ist um so stärker, je mehr die Richtung des Lichtstrahls von der optischen Achse abweicht, d. h. je schräger das Licht einfällt.

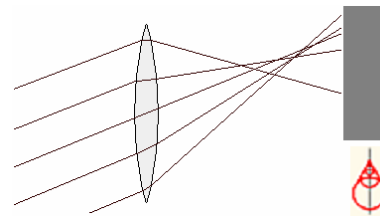


Abbildung 20: Koma

- Korrektur** Der Effekt von Koma (Abbildung 20) und Bildfeldwölbung (Abbildung 16) lassen sich durch Abblenden reduzieren.
- Vergütung** Linsensysteme sind so konzipiert, dass sie soweit es überhaupt möglich ist, alle diese Fehler kompensieren. Dazu werden z. B. Linsen aus verschiedenen Glassorten eingesetzt. Durch Reflexionen oder Streuung an den Grenzflächen können sie ihrerseits auch Abbildungsfehler (Unschärfe) verursachen. Um diesen Fehler minimal zu halten, werden sie mit Beschichtungen versehen, die diesen Fehler vermeiden helfen. Solch eine Beschichtung wird Vergütung genannt. Hochwertige Objektive sind auch mit der Bezeichnung MC versehen. MC steht für Multicoating (Mehrschichtvergütung).
- Brennweite** Auch bei Linsensystemen oder dicken Linsen gibt es eine Brennweite. Hier wird sie als Abstand von der Hauptebene angegeben (siehe Abbildung 15). Typische Werte sind:  
3,5; 4,5; 6; 8; 10; 12; 16; 25; 35; 75; 100 [mm]  
Ähnliche Werte, ergänzt durch noch größere, bei Teleobjektiven, sind aus der Fotografie bekannt.
- Arbeitsabstand** Schwieriger ist es, den Objektabstand zu bestimmen. Speziell bei Linsensystemen ist die Lage der Hauptebene nicht ohne weiteres bekannt. Einfacher zu bestimmen ist der Arbeitsabstand (nicht zu verwechseln mit dem Arbeitsabstand bei induktiven Sensoren). Das ist der Abstand zur Vorderkante der Optik, der Abstand zwischen G und S1 in Abbildung 21.

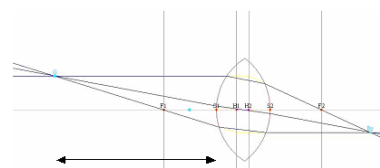


Abbildung 21: Arbeitsabstand

Dieser Arbeitsabstand hängt ab vom Objektivtyp und der Scharfeinstellung. Bei hochwertigen Fotoapparaten befindet sich eine Markierung auf dem Gehäuse für die Bildebene.

- Blende** Die Lichtstärke eines solchen Systems ist durch die Blendenzahl  $k$  gegeben:  
$$k = f / D$$
  
 $f$  ist die (objektseitige) Brennweite und  $D$  (näherungsweise) der Durchmesser der Frontlinse.
- Beispiel** Standardobjektiv (Kleinbild),  $f = 50$  mm,  $D = 35$  mm  
Dann ergibt sich  $k \cong 1,4$ . Das ist ein recht lichtstarkes Objektiv.

Blendenreihe	Die Blendenreihe ergibt sich durch Multiplikation mit $\sqrt{2}$ (die Kreisfläche ist proportional zum Quadrat des Durchmessers), also 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; ...
Konturerkennung	Bei der Konturerkennung geht es darum, Grenzen zwischen Bereichen unterschiedlicher Helligkeit zu finden. Dazu ist eine hohe Lichtstärke günstig.
Zusammenfassung	<p>Die Einflüsse, die Fehler der Bildschärfe verursachen, sollen kurz zusammengefasst werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schärfe nicht optimal eingestellt</li> <li>• zu wenig Schärfentiefe</li> <li>• Beugungsunschärfe</li> <li>• Bewegungsunschärfe (des Objekts)</li> <li>• Bewegungsunschärfe (des Aufnahmesystems)</li> <li>• Farbunschärfe</li> <li>• schlechter Kontrast (Verschmutzung von Objektiv, Sensor, Beleuchtung, unvergütete Optiken)</li> <li>• Schlierenbildung in der Umgebungsluft (durch Temperaturunterschiede)</li> </ul> <p>Durch die oben beschriebenen Zusammenhänge wird klar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die Schärfentiefe wird erhöht und die meisten Abbildungsfehler werden reduziert durch Ablendung</li> <li>• Den efector dualis kann man nicht abblenden wie einen Fotoapparat. Die Blende ist fest vorgegeben. Sie kann aber aus den genannten Gründen nicht weit offen sein, um eine maximale Lichtausbeute zu erhalten.</li> </ul> <p>Außerdem gilt offenbar: geringe Bewegungsunschärfe erfordert kleine Belichtungszeiten</p>
Beleuchtung	Beide Anforderungen können nur bei ausreichender Beleuchtung erfüllt werden. Der Kontursensor wird nur im Zusammenspiel mit einer Beleuchtungseinrichtung (als Zubehör erhältlich) zuverlässig arbeiten.



Abbildung 22: Zubehör zur Beleuchtung

### 2.3 Perspektive

Malerei

Die Perspektive ist schon lange ein Thema, speziell bei der Anfertigung von Abbildungen in der Malerei. Dieses Thema kann hier auch nicht umfassend behandelt werden. Es wird versucht, eine Idee zu vermitteln, worum es dabei geht.

Fluchtpunktperspektive

Eine Perspektive, die wahrscheinlich allen vertraut ist, weil sie besonders geeignet ist, einen Eindruck von räumlicher Tiefe zu erzeugen, ist die Fluchtpunktperspektive.

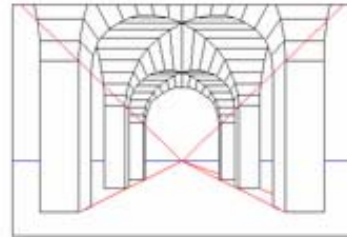


Abbildung 23: Zentralperspektive

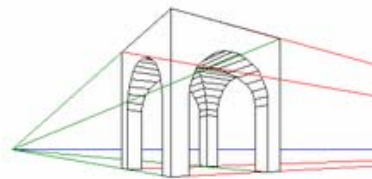


Abbildung 24: 2-Fluchtpunktperspektive

Größe

Bei dieser Perspektive ist deutlich eine Eigenschaft zu erkennen: nahe Objekte werden größer dargestellt als entferntere. Sie fällt unter den Begriff entozentrische Perspektive. Sie ist offenbar für Messungen weniger geeignet.

efector dualis

Beim efector dualis soll keine Länge gemessen werden sondern die Übereinstimmung einer Kontur mit einer zuvor "geteachten" Musterkontur geprüft werden. Dafür genügt die übliche entozentrische Perspektive. Da die Bildgröße von der Entfernung abhängt, muss vorausgesetzt werden, dass die Objekte den gleichen Abstand zum Sensor haben (innerhalb einer einstellbaren Toleranz). Das wird ausführlicher in 3 beschrieben. Die folgende Beschreibung soll verdeutlichen, warum der efector dualis kein Messgerät ist. Da die erläuterten Begriffe bei der Beschreibung optischer Systeme vorkommen, ist damit zu rechnen, dass Anwender nach den Abbildungseigenschaften fragen. Es wird deutlicher, was der efector dualis leisten kann, wenn auch klar ist, was er nicht kann.

Wenn es dagegen auf die korrekte Darstellung von Maßen ankommt, dann ist, z. B. beim technischen Zeichnen, auch eine andere Perspektive gebräuchlich. Um den Unterschied zur entozentrischen Perspektive zu verdeutlichen, wird sie im folgenden kurz erläutert.

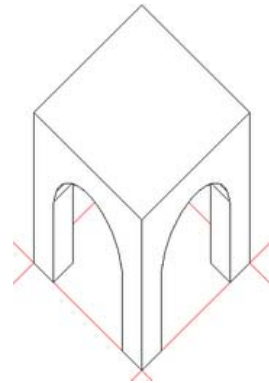


Abbildung 25: Maßstabgetreue Perspektive

maßstabgetreu	Strecken, die parallel zu den Achsen verlaufen, werden maßstabgetreu abgebildet. Da das Bild durch eine Parallelprojektion erzeugt wird, ergibt sich diese Eigenschaft. Sie wird auch isometrische Projektion genannt.
telezentrisch	<p>Parallelprojektion heißt, dass die Strahlen in einem entsprechenden optischen System parallel zur optischen Achse verlaufen. Weil dann der Fluchtpunkt praktisch im Unendlichen liegt wird diese Perspektive auch telezentrisch genannt.</p> <p>Telezentrisch ist die spezielle Form der Perspektive, bei der das Prinzip der Parallelprojektion (Achsparallelität) angewandt wird. Dabei erscheinen gleich große Objekte in unterschiedlicher Entfernung gleich groß, d.h. der Abbildungsmaßstab bleibt bei Änderung der Objektentfernung konstant</p> <p>Optische Systeme, die darauf ausgelegt sind werden z. B. auch kurz telezentrische Objektive genannt. Man spricht dann auch von telezentrischer Abbildung.</p>
objektseitig und bildseitig Digitalkamera	<p>Für optoelektronische Messvorrichtungen kommt es genauer gesagt darauf an, dass der objektseitige Strahlengang telezentrisch ist.</p> <p>Bei Digitalkameras ist es dagegen von Bedeutung, dass der bildseitige Strahlengang telezentrisch ist. Während es bei fotografischem Film praktisch keinen Unterschied ausmacht, ob das Licht senkrecht oder schräg auf ihn fällt, so ist bei Pixeln auf einem Empfängerchip die Empfindlichkeit deutlich geringer, wenn das Licht schräg auftrifft. Daher ist es nur bedingt möglich konventionelle Objektive an Digitalkameras zu verwenden. Man muss, speziell bei Weitwinkelobjektiven, mit Qualitätseinbußen rechnen. Aus diesem Grunde gibt es viele Neukonstruktionen bei Objektiven für Digitalkameras. Sie sind so ausgelegt, dass der bildseitige Strahlengang möglichst telezentrisch ist. Da dann das Licht praktisch senkrecht einfällt werden damit optimale Resultate erzielt.</p>
teleskopisch	Es gibt auch optische Systeme, die auf beiden Seiten, auf Objektseite und auf Bildseite, telezentrisch sind. Man sagt dann, sie erzeugen eine teleskopische Abbildung (im Maßstab 1:1).
Wie wird Telezentrie erzeugt?	Zunächst wird ein punktförmiges Objekt betrachtet, von dem aus Strahlen nach allen Seiten verlaufen. Die Strahlen, die auf die Linse fallen, werden im Bildpunkt vereinigt.

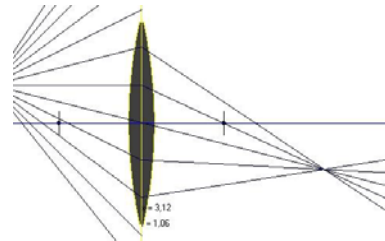


Abbildung 26: Strahlenbündel frei

Blende

Wird nun am bildseitigen Brennpunkt, genauer in der Brennebene, eine Blende eingefügt, dann werden die besonders schrägen Strahlen abgeschnitten.

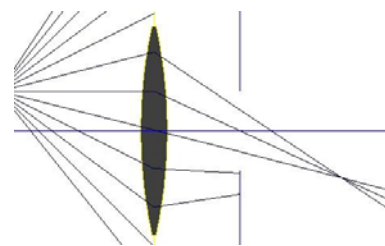


Abbildung 27: Strahlenbündel mit Blende

telezentrischer Bereich

Durch diese Blende werden nur die Strahlen durchgelassen, die auf der Objektseite (näherungsweise) parallel zur optischen Achse verlaufen. In Abbildung 27 ist die Abweichung von der Achsenrichtung zur Verdeutlichung etwas übertrieben dargestellt. Auch in der Realität werden solche Winkelabweichungen vorkommen. Ihr Ausmaß gibt die Qualität des optischen Systems wieder. Es werden auch, je nach Auslegung der Optik, nicht alle Objekte in beliebigem Abstand telezentrisch abgebildet. Es gibt in der Regel einen Bereich dafür, in dem diese Eigenschaft optimal realisiert ist.

Eigenschaften und Vorteile

Die Firma Zeiss fasst in der Beschreibung Ihrer telezentrischen Objektive die Eigenschaften und Vorteile zusammen:

*Eigenschaften*

*Telezentrische Objektive arbeiten mit parallelem Strahlengang. Nur ein kleiner Unterschied zu herkömmlichen Fotoobjektiven, aber der hat das berührungslose Messen, Prüfen und Erkennen von Körpern mittels CCD-Kameras revolutioniert. Weil sich im telezentrischen Bereich selbst bei unterschiedlichen Objektentfernungen immer konstante Bildgrößen ergeben, beeinflussen Tiefenausdehnungen Ihre Messungen nicht mehr.*

*Vorteile*

*Die Abbildung selbst schwieriger Formen erfolgt exakt.  
Die Korrektur der Messergebnisse mittels Software kann entfallen  
Das Messobjekt kann innerhalb großer Toleranzen frei positioniert werden  
Die Erkennung von Strukturen in Hohlräumen mit ungünstigen Geometrien wird überhaupt erst möglich  
Der parallele Strahlengang bewirkt eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Streulicht*

Dort (bei Zeiss) ist auch ein anschauliches Beispiel zu finden.

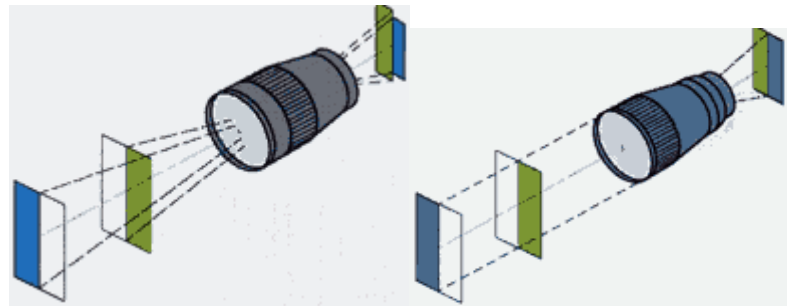


Abbildung 28: Ento- und telezentrische Perspektive

Links ist die entozentrische und rechts die telezentrische Perspektive dargestellt. Dabei wird verdeutlicht, dass bei der telezentrischen Perspektive die Bildgröße nicht vom Abstand abhängt.

Rohr

Als weiteres Beispiel soll ein Hohlzylinder, z. B. ein Rohr, betrachtet werden.

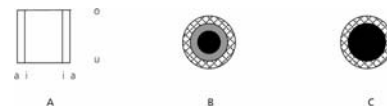


Abbildung 29: Rohr in Form eines Hohlzylinders

A: Rohr von der Seite gesehen (Längsschnitt); a: außen, i: innen, o: oben, u: unten;  
 B: Rohr von oben gesehen in Fluchtpunktperspektive (entozentrisch); C: Rohr von oben gesehen in telezentrischer Perspektive

A:

In der obigen Abbildung dient A nur zur Veranschaulichung, wie der das Rohr (in Form eines Hohlzylinders) aussieht.

B:

In B wird das Rohr in der üblichen Perspektive gezeigt. Der schraffierte Bereich ist der obere Rand des Rohres (zwischen oi und oa). Der graue Bereich ist das Innere des Rohres (zwischen oi und ui). In dieser Perspektive scheint sich das Rohr zu verjüngen (in Richtung auf einen zentralen Fluchtpunkt hin). Die schwarze Scheibe gibt den scheinbaren Durchmesser des unteren inneren Randes (ui) wieder.

C:

In C erscheint das Rohr wegen der telezentrischen Abbildung als Kreisring. Der innere und der äußere Durchmesser oben und unten (oa und ua, bzw. oi und ui) können nicht unterschieden werden.

Wäre z. B. das Rohr etwas seitlich verschoben, blickt man also etwas neben dem Rohr senkrecht nach unten, dann würde in B der innere Bereich auch seitlich verschoben wirken. In C hätte das keinen Einfluss.

Form und Schärfe

An kann man sich auch diesen Zusammenhang klar machen. Hier wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass sich das ganze Rohr im Bereich der Tiefenschärfe befindet.

Würde man exakt auf den oberen Rand scharf stellen, dann wäre (entsprechend den Eigenschaften der Optik) der untere Rand unscharf. Bei B hätte man dann keinen scharfen Rand zwischen dem grauen Bereich (Innenwand des Rohres) und der schwarzen Scheibe (Auflagefläche des Rohres, begrenzt durch den unteren inneren Rand ui). Bei C dagegen könnte man praktisch keinen Unterschied feststellen.

Würde man auf den unteren Rand scharfstellen, dann wäre in B der schraffierte Bereich, der obere Rand des Rohres unscharf. In C hätten wir den gleichen Effekt, auch hier wäre dieser Bereich unscharf. Die Form des Bildes würde sich aber in keinem dieser Fälle ändern.

Zusammengefasst bedeutet das für die telezentrische Abbildung:

- bei einer Verschiebung des Objekts in Richtung der optischen Achse wird das Bild zwar etwas unscharf, der Abbildungsmaßstab bleibt konstant.

Messtechnik

Die telezentrische Abbildung ist deswegen für die optische Messtechnik von großer Bedeutung, da Längenmessungen am Bild Aussagen über eine Gegenstandsgröße zulassen.

### 3 Eigenschaften des Kontursensors

#### 3.1 Schärfe beim efector dualis

Beleuchtung

Es soll noch einmal daran erinnert werden, dass eine hinreichende Beleuchtung für eine zuverlässige Erfassung einer Kontur (siehe Abbildung 22) notwendig ist

Durchlichtverfahren

Beim efector dualis befindet sich die Beleuchtung auf der dem Sensor abgewandten Seite des Objekts. Das heißt, das Objekt befindet sich zwischen der Beleuchtung und dem Sensor. Diese Art der Beleuchtung wird als Durchlichtverfahren bezeichnet. Genau genommen kann das Licht nur transparente oder halbtransparente Objekte durchdringen. Ist das Objekt undurchsichtig, wird praktisch ein "Schattenriss" des Objektes erzeugt. Auch dieser Spezialfall fällt unter diese Bezeichnung.

Fokussieren

Beim Kontursensor efector dualis O2D kann bei der Parametrierung die Bildschärfe optimal eingestellt werden. Dazu wird über eine Einstellschraube fokussiert. Das ist der gleiche Vorgang wie das Scharfstellen beim Fotoapparat.

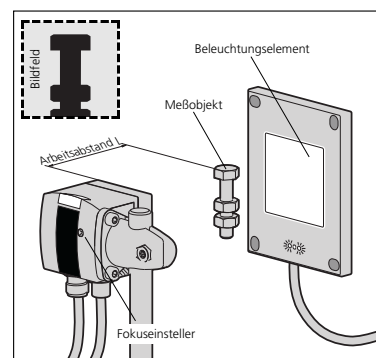


Abbildung 30: Anwendung des O2D

In Abbildung 30 ist u. a. zu sehen, wo der Sensor, bzw. das Bild, scharf gestellt wird.

Die Software zur Parametrierung gibt durch eine Balkenanzeige eine Orientierungshilfe zur Bildschärfe. Dazu wird der Kontrast ausgewertet (siehe oben). Das Gerät hat keine verstellbare Blende. Daher ist hier der Bereich der Schärfentiefe immer gleich. Bei diesem Gerät kann aber eine Toleranz festgelegt werden. Im Idealfall ist die Begrenzung der Kontur eine scharfe Linie. Denkt man sich diese Linie durch einen Streifen oder ein Band mit konstanter Breite ersetzt, dann ist durch dessen Breite die Toleranz festgelegt. Hier wird der Begriff Toleranzschlauch verwendet. Damit lassen sich auch kleine Ungenauigkeiten in der Fokussierung kompensieren. Außerdem ergibt auch dadurch eine Unschärfe, wenn die Objekte sich nicht alle in präzise dem gleichen Abstand befinden. Dazu kommt die Veränderung der Bildgröße, die in der entozentrischen Perspektive vom Abstand abhängt. Natürlich ist daneben auch noch wichtig, welche Toleranzen in den Abmessungen der Objekte zugelassen werden sollen. In der Software wird diese Breite als Toleranzschlauchbreite bezeichnet.

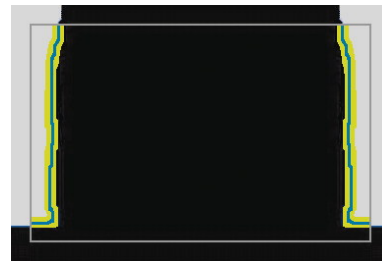


Abbildung 31: Toleranzschlauch

In Abbildung 31 ist ein Objekt als Kontur mit seinem Toleranzschlauch zu sehen. Abbildung 32 zeigt ein Objekt, dessen Kontur offensichtlich abweicht.



Abbildung 32: Abweichende Kontur

Toleranzschlauch

Kurz zusammengefasst sind es also unterschiedliche Größen, die die Breite des Toleranzschluchs bestimmen:

- Unschärfe des Bildes (z. B. wegen unterschiedlicher Abstände der Objekte)
- Änderung der Größe des Bildes (wegen unterschiedlicher Abstände der Objekte)
- zulässige Fertigungstoleranzen

### 3.2 Auflösung beim efector dualis

**Auflösung und Pixel**

In 2.2.4, Abbildung 13, wurde der Zusammenhang zwischen Auflösung und Pixelgröße schon beschrieben. Es soll daran erinnert werden, dass die Anzahl der Pixel nicht mit der Auflösung gleichzusetzen ist, auch wenn die Werbung für Digitalkameras das manchmal suggeriert. Im folgenden werden die praktischen Konsequenzen beim efector dualis erläutert.

**Pixel**

Der Kontursensor hat  $320 \times 240 = 76800$  Pixel, die als Matrix angeordnet sind. Auf diese Matrix fällt das Licht, das von der Optik darauf fokussiert wird. Die Größe des Bildes hängt, wie oben beschrieben, von den Eigenschaften des Linsensystems, der Brennweite, und dem Abstand ab. Aus der Abbildung 13 ist zu erkennen, dass die Linien nur aufgelöst werden können, wenn das Bild größer ist. Das ist zu erreichen, indem die Entfernung verringert wird. Das wiederum hat zur Folge, dass die Schärfentiefe geringer wird.

**Schärfentiefe und Auflösung**

Zusammengefasst bedeutet das: bei höherer Auflösung ist die Schärfentiefe geringer.

**Grenze**

Aus diversen Gründen, u. a. auf Grund der möglichen Abbildungsfehler, siehe 2.2 , ist die Auflösung auf 0,1 mm begrenzt.

**Auswahl**

Aus den oben beschriebenen Eigenschaft der entozentrischen Abbildung lässt sich sagen: die Auflösung ist umso höher, je näher sich das Objekt am Sensor befindet.

Dann ist das Bild des Objekts nämlich am größten. Wie oben beschrieben wurde (vgl. 2.2.3), lässt sich das am besten mit der Weitwinkeloptik realisieren. Andererseits gilt: die Größe des Objekts ist durch die Bildfeldgröße begrenzt.

Für eine Anwendung ist also zu prüfen, ob sich bei der Erfüllung dieser Anforderungen ein Kompromiss finden lässt.

Da das Zusammenwirken der verschiedenen Einflussgrößen nicht einfach zu übersehen ist, sollte sich der Anwender bei der Auswahl des optimalen Typs beraten lassen.

**3.3 Bildfeld**

In 2.2.3 wurde dieser Begriff schon allgemein erläutert. Hier sollen noch einige Werte als Beispiel genannt werden. Sie sind auch in den Datenblättern der jeweiligen Typen zu finden. Die Bedeutung der Begriffe ist auch in Abbildung 30 zu erkennen. Wie oben erwähnt, sollte der relevante Konturbereich des Objekts ca. 50 bis 70 % des Bildfeldes ausfüllen.

Typ O2D210, O2D211				
Arbeitsabstand L	[mm]	30	40	75
Bildfeldgröße	[mm]	--	9 x 12	16 x 21
Arbeitsabstand L	[mm]	100	200	400
Bildfeldgröße	[mm]	21 x 27	41 x 53	80 x 104
Typ O2D212, O2D213				
Arbeitsabstand L	[mm]	30	40	75
Bildfeldgröße	[mm]	13 x 17	16 x 21	26,5 x 35
Arbeitsabstand L	[mm]	100	200	400
Bildfeldgröße	[mm]	34 x 44,5	63 x 84	123 x 163
Typ O2D214, O2D215				
Arbeitsabstand L	[mm]	30	40	75
Bildfeldgröße	[mm]	20 x 27	24 x 32	38 x 50

Arbeitsabstand L	[mm]	100	200	400
Bildfeldgröße	[mm]	48 x 62	88 x 114	165 x 214

Abbildung 33: Bildfeld und Abstand

### 3.4 Weitere Hinweise

In diesen Unterlagen geht es um die optischen Grundlagen. Das heißt es geht im wesentlichen darum, wie das Bild auf dem Empfängerchip entsteht, welche Eigenschaften es hat und, allgemein, was die Fachbegriffe bedeuten, die in diesem Zusammenhang verwendet werden. Dazu gehört nicht die Beschreibung der Algorithmen, die im Sensor zum Einsatz kommen, um die aufgenommene Kontur mit einer vorher abgespeicherten (geteachten) Referenz zu vergleichen. Das ist ohnehin ein Thema für Spezialisten, das mit der praktischen Anwendung wenig zu tun hat (siehe 1.2 ).

Die elektrischen Daten, Strombedarf, zulässiger Bereich der Versorgungsspannung usw. haben viel mit anderen Sensortypen gemeinsam. Sie werden hier auch nicht behandelt. Bei Bedarf findet man sie auf dem Datenblatt und dieses bei [www.ifm-electronic.com](http://www.ifm-electronic.com).

Dort findet sich auch die [Betriebsanleitung](#), in der ausführlich die Software zur Parametrierung des Sensors beschrieben wird.

Wer mehr wissen möchte über ein Thema, das hier nur kurz angerissen wurde, dem stehen viele Möglichkeiten offen. Hier soll nur [Wikipedia](#) erwähnt werden.

**E N D E**