

Kombination von Arbeitsabstand, Auflösung und Schärfentiefe

Damit die Messqualität nicht auf Distanz geht

Mess- und Inspektionsobjekte lassen sich an den Hauptkriterien Auflösungsvermögen und Schärfentiefe bewerten. Bei großen Werkstücken beeinflusst allerdings der Arbeitsabstand diese beiden Kriterien. Die Kunst liegt in der idealen Abstimmung.

Prüflinge werden beim optischen Messen oder Inspizieren unter das Objektiv geführt. Um den Arbeitsablauf zügig zu gestalten, sollten sich die Werkstücke möglichst leicht und schnell auf das Messgerät legen und auch wieder entfernen lassen. Dabei spielt der Arbeitsabstand, also der Abstand vom untersten Punkt des Objektivs bis zur Gegenstandsebene, eine wichtige Rolle. Mit Gegenstandsebene ist der Bereich des Werkstücks gemeint, der im Bild scharf eingestellt ist.

Bei flachen Prüflingen und solchen mit nur geringen Höhenabstufungen verursacht auch ein relativ geringer Arbeitsabstand meist keine Probleme, da das Messobjektiv fest eingestellt werden kann. Ganz anders sieht es allerdings aus, wenn das Werkstück wegen größerer Höhenunterschiede in seiner Struktur ein häufiges Nachfokussieren während der Prüfung erfordert. Haben Objektiv nur einen kleinen Arbeitsabstand, kann es bei einem solchen Fokussieren leicht geschehen, dass das Objektiv - bedingt durch eben diesen geringen

Arbeitsabstand - auf dem Werkstück aufsetzt. Das hat zumindest zur Folge, dass der Prüfbereich neu eingestellt oder das verschobene Werkstück neu ausgerichtet werden muss. Beides verzögert den Arbeitsablauf. Im ungünstigsten Fall könnte zudem das Werkstück oder gar das Messobjektiv durch den hohen Druck beim Aufsetzen beschädigt werden - eine Kollision mit teuren Folgen.

Bei einem Objektiv mit größerem Arbeitsabstand lassen sich diese Risiken erheblich begrenzen. Zum einen ermöglicht ein großer Arbeitsabstand einfaches und sicheres Arbeiten, da die Gefahr von Beschädigungen am Objektiv beim Auflegen und Entfernen des Werkstücks relativ gering ist. Zum anderen gestaltet sich auch das Fokussieren des Bildes problemlos, da kaum die Wahrscheinlichkeit besteht, das Objektiv versehentlich auf das Werkstück aufzusetzen.

Könnte man also etwaige Schwierigkeiten nicht ganz einfach umgehen, indem man die Objektive mit sehr großen Arbeitsabständen versieht? So leicht geht es leider nicht. Weil dieser so einfachen Lösung gleich mehrere physikalische Grenzen und Herausforderungen der Optik entgegenstehen, zum Beispiel das Auflösungsvermögen und die Schärfentiefe.

Großer Arbeitsabstand heißt kleinere Auflösung

Ein größerer Arbeitsabstand führt immer zu einem kleineren Auflösungsvermögen. Wenn mit sichtbarem Licht gearbeitet wird und das Medium zwischen Objektiv und Prüfobjekt Luft ist, dann liegt der maximale physikalische Grenzwert für die Auflösung theoretisch bei $0,2 \mu\text{m}$. Dieser Grenzwert wird aller-

dings nur dann erreicht, wenn der Öffnungswinkel des Objektivs 90° beträgt. Mit anderen Worten, das Werkstück müsste in diesem Fall im Objektiv liegen. Je weiter also das Werkstück vom Objektiv entfernt ist, umso steiler wird der Öffnungswinkel und umso schlechter das Auflösungsvermögen.

Arbeitsabstand und Schärfentiefe

Ein weiterer Indikator für die Qualität eines Objektivs ist neben der Auflösung die Schärfentiefe. Sie bezeichnet die Länge entlang der optischen Achse, in der das durch das Objektiv erzeugte Bild scharf erscheint.

Theoretisch müssten sich die Lichtstrahlen, die von einem Punkt des Gegenstands ausgehen, auch alle wieder in einem Punkt schneiden. Das ist allerdings bei den in Objektiven meist eingesetzten sphärischen Linsen wegen verschiedener Abbildungsfehler, die wiederum gerade durch die sphärische Form der Linse entstehen, nicht der Fall.

Es besteht also immer eine gewisse Grundunschärfe, die es dem Anwender unmöglich macht, einen definierten Punkt auf der optischen Achse zu finden, an dem die Unschärfe minimal ist. Es gibt vielmehr immer einen kleinen Bereich entlang der optischen Achse, in dem sich die Schärfe des Abbilds nicht erkennbar ändert. Die Breite dieses Bereichs wird Schärfentiefe genannt. Es ist leicht erkennbar, dass ein steilerer Öffnungswinkel des Objektivs, wie er ja bei großem Arbeitsabstand gegeben ist, diesen Effekt noch verstärkt. Umgekehrt führt ein kleiner Arbeitsabstand aufgrund des dann flachen Öffnungswinkels automatisch zu einer geringeren Schärfentiefe.

Der Öffnungswinkel wird natürlich auch größer, wenn die Brennweite abnimmt oder der Linsenradius größer wird. Da der Linsenradius bei abgeglichenen Objektiven jedoch nicht frei wählbar ist, ist eine Änderung des Öffnungswinkels nur durch eine Änderung des Arbeitsabstands möglich.

Für reine Betrachtungen ist ein großer Schärfentiefenbereich sicherlich von Vorteil, da kleinere Höhenunterschiede nicht zu einem wiederholten Nachfokussieren führen. Für Messungen und Auswertungen im Bild ist eine hohe Schärfentiefe jedoch ein großer Nachteil, da es hier zu perspektivischen Verzerrungen kommt, die jede Auswertung verfälschen können. Gleichzeitig wird eine Höhenmessung, die nur durch Scharfstellung realisiert werden kann, mit zunehmender Schärfentiefe ungenauer.

Es gilt also Objektive zu finden, die einerseits einen relativ großen Arbeitsabstand und andererseits dennoch ein hohes Auflösungsvermögen und eine kleine Schärfentiefe besitzen.

Geometrische und chromatische Aberration

Neben Auflösung und Schärfentiefe gibt es weitere Kriterien, an deren Beherrschung sich die Qualität und Leistungsfähigkeit eines Objektivs festmachen lassen: die Korrektur der auftretenden Abbildungsfehler.

Betrachtet man anstelle der Lichtstrahlenverläufe einen Schnitt auf der Bildseite, also eine einzelne Bildebene, treten in dieser Bildebene verschiedene Fehler in der Abbildung auf. Entsprechend ihrer Ursache werden sie in geometrische und chromatische Fehler beziehungsweise Aberrationen aufgeteilt.

Wie bereits erwähnt, sammelt sich Licht, das von einem Punkt eines Gegenstands ausgeht auf der Bildseite nicht wieder exakt an einem Punkt. Nur wenn das der Fall wäre, wäre auch die Abbildung scharf und fehlerfrei. Ursache für diese Art der Abbildungsfehler ist also die geometrische Form der Linse – sie führt zu „geometrischen Aberrationen“.

In der Hauptsache unterscheidet man die fünf „Seidelschen“ geometrischen Aberrationen:

- sphärische Aberration
- Koma
- Astigmatismus
- Bildfeldwölbung
- Verzeichnung

Die **sphärische Aberration** ist ein Öffnungsfehler, der bei sphärischen Linsen mit größerem Durchmesser und stärkerer Krümmung auftritt. In den Randbereichen dieser Linsen werden Lichtstrahlen stärker gebrochen als in den mittleren Bereichen. Das führt dann zu dem beschriebenen Effekt, dass es keinen eindeutigen Brennpunkt mehr gibt.

Eine weitere spezielle Form des Öffnungsfehlers ist die **Koma**. Sie tritt auf, wenn ein stark seitlich der optischen Achse liegender Punkt abgebildet wird.

Astigmatismus tritt auf, wenn man zur Abbildung eines seitlich der optischen Achse gelegenen Punktes nur Randstrahlen verwendet. Lichtstrahlen, die ent-

lang einer gedachten Ebene von der optischen Achse nach außen verlaufen, treffen auf eine stark gekrümmte Linsenoberfläche. Lichtstrahlen, die quer zu dieser Ebene verlaufen, treffen dagegen auf eine wesentlich weniger gekrümmte Oberfläche. Dadurch werden die beiden Ebenen auch unterschiedlich gebrochen und erhalten unterschiedliche Abbildungsebenen.

Beim Abbilden von Gegenständen, die im Verhältnis zur Linse relativ groß sind, kann es bei der Abbildung zu einem Fehler durch **Bildfeldwölbung** kommen.

Und schließlich: Zur **Verzeichnung** infolge des Öffnungswinkels kommt es, wenn durch Blenden die Hauptstrahlen „abgeschnitten“ werden. Dabei unterscheidet man zwei Arten der Verzeichnung, die Tonnen- und die Kissenverzeichnung. Die Art der Verzeichnung hängt von der Anordnung der Blende vor oder hinter der Linse ab.

Neben diesen geometrischen Aberrationen gibt es die „chromatischen Aberrationen“, deren Ursache in der naturgemäßen Aussendung verschiedenfarbiger Lichtstrahlen liegt. Licht unterschiedlicher Wellenlängen wird verschieden stark gebrochen. Das heißt, von einem Gegenstandspunkt, der Licht in mehreren Wellenlängen aussendet, werden auch mehrere Abbildungen erzeugt, die auf der Bildebene leicht versetzt zueinander und jeweils in einer anderen Wellenlänge dargestellt werden. Eine Plankorrektur der geometrischen sowie der apochromatischen Korrektur der chromatischen Aberration sollte üblich sein.

Fazit

Beim Prüfen mit Mess- und Inspektionsobjektiven sollten Auflösungsvermögen, Schärfentiefe und die Korrektur von Aberration mit dem Arbeitsabstand abgestimmt werden. Es ist nicht leicht, das Leistungspotenzial eines Mess- oder Inspektionsobjektivs zu bewerten. Ein Auswahlkriterium sind Leistungsbeweise, wie sie zum Beispiel Mitutoyo antritt. Laut Mitutoyo bietet das Hyper MF-U-System im weltweiten Vergleich die größten Arbeitsabstände bei gleichzeitig hohem Auflösungsvermögen. Sowohl Plankorrektur als auch eine apochromatische Korrektur sind berücksichtigt.