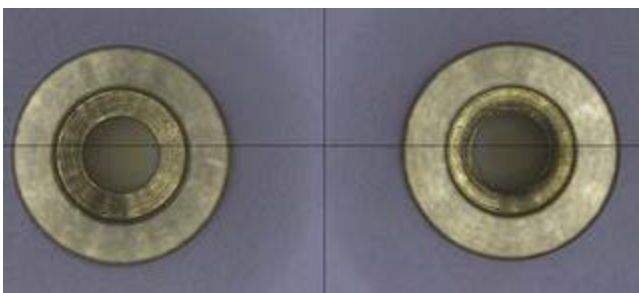


## MIT TELEZENTRISCHER OPTIK DIE QUALITÄT UND REPRODUZIERBARKEIT OPTIMIEREN

### Wie sich leicht zu übersehende Fehler in der Fertigung vermeiden lassen

#### Einleitung

Als 1590 die ersten Mehrlinsen-Mikroskope erfunden wurden, staunten Wissenschaftler über die neuen Möglichkeiten, kleine Objekte und Details aus der Natur zu sehen, die bis dahin für das Auge unsichtbar und daher völlig unbekannt waren. Heute werden Mikroskope längst nicht mehr nur in der Wissenschaft eingesetzt. Insbesondere während der letzten fünf Jahrzehnte haben die Miniaturisierung von Produkten und die automatisierte Fertigung Mikroskope auch in der Industrie zu einem unverzichtbaren Werkzeug gemacht. Mikroskope sind in vielen verschiedenen Montage- und Prüfungsanwendungen zu finden, in denen die Visualisierung und Messung winziger Details erforderlich sind.



Moderne Mikroskope liefern große, scharfe und brillant ausgeleuchtete Bilder. Diese eindrucksvollen Bilder vermitteln schnell den Eindruck, dass sie maßhaltig sind, aber das trifft nicht unbedingt zu.

Bei der Untersuchung eines Punktes, dessen Abstand von der Linse nicht genau bekannt ist oder der sich nicht direkt in der optischen Achse des Linsensystems eines Mikroskops befindet, können grundlegende Prinzipien der Optik zu Verzerrungen führen, die dann zu Beobachtungs- und Messfehler führen können.

Standardoptiken können zur Überprüfung zweidimensionaler Objekte wie etwa Bahnen auf einer Leiterplatte oder zur qualitativen Analyse nicht flacher Objekte ausreichen. Bei der präzisen Messung oder dem Vergleich der Merkmale eines dreidimensionalen Objekts wie beispielsweise der gekrümmten Oberfläche eines Spritzgussteils sind diese Fehler allerdings problematisch.

Die Wahl eines Mikroskops mit der richtigen Optik kann diese leicht zu übersehenden Fehler erheblich reduzieren und Ergebnisse liefern, die deutlich genauer und reproduzierbar sind - zwei wichtige Kriterien bei modernen Prüfverfahren und optischen Messungen.

---

#### Autor

Clinton Smith  
Senior Product Manager Stereo & Digital Heerbrugg,  
Leica Microsystems

## Fehlertypen

### Fehler aufgrund unterschiedlicher Vergrößerung

Wenn von mehreren gleichen Objekten Bilder für Messungen gemacht werden, aber die Objekte nicht exakt denselben Abstand zur Objektivlinse haben, werden die Objekte unterschiedlich groß abgebildet. Diese Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Vergrößerung können bei Mikroskopen mit Standardoptiken leicht passieren. (Abb. 2). Dies kommt vor wenn eine Reihe von Objekten wiederholt gemessen werden, die sich nicht in gleichem Abstand von der Objektivlinse befinden, oder bei der Messung mehrerer Merkmale auf unterschiedlichen Höhen eines drei-dimensionalen Produkts.

Diese Abweichungen führen zu ungenauen Messwerten und das ein Prüfer fehlerhafte Teile nicht erkennt oder fehlerfreie aussortiert, was wiederum mehr Ausschuss oder Nacharbeit in der Montage verursacht. Zudem sind die Ergebnisse nicht mehr reproduzierbar, wenn der Abstand von der Probe zur Linse unterschiedlich ist, wie etwa beim Prüfen mit handgeführten Geräten, beim nachträglichen Prüfen nach einer Nachbearbeitung oder der nach einem Montageschritt, der die Höhe oder Länge der Probe verändert.

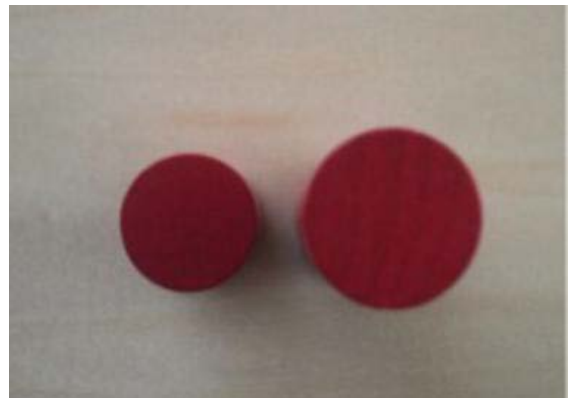


Abb. 2: Ein Beispiel für unterschiedliche Bilder von zwei Dübeln desselben Durchmessers, jedoch unterschiedlicher Höhe. Die perspektivische Ansicht zeigt die relative Größe (links). In der Draufsicht der beiden Elemente (rechts) scheint der längere Dübel größer zu sein, da er sich näher bei der Linse befindet.

### Zoomfehler

Fehler durch unterschiedliche Vergrößerungen können beim Einsatz einer Zoom-Funktion auch einen Sekundärfehler verursachen. Zoomen und Fokussieren bei nicht telezentrischen Linsen können unbeabsichtigte und unkontrollierte Vergrößerungsschwankungen auslösen.

Manuelles, freies Zoomen hat eine zusätzlich negative Auswirkung auf die Reproduzierbarkeit der Bildgebung. Reproduzierbarkeit ist definiert als die Möglichkeit, für Wiederholungstests zu denselben Einstellungen zurückzukehren und eine Untersuchung zu einem späteren Datum mit vergleichbaren Ergebnissen zuverlässig zu wiederholen. Da

Prüfstationen routinemäßig zwischen Setups für viele verschiedene Teile und Baugruppen hin- und herschalten, ist hohe Reproduzierbarkeit sehr wichtig. Die zuverlässige Rückkehr zu identischen Testeinstellungen beim manuellen Zoomen ist sehr schwierig, und die resultierenden Abweichungen können bei aufeinanderfolgenden Tests zu inkonsistenten Messungen führen.

### Parallaxenfehler

Parallaxenfehler (auch als Perspektivenfehler bekannt) durch abweichende Vergrößerungen werden beim Betrachten dreidimensionaler Objekte oder beim Vergleich von Objekten hervorgerufen, die sich in unterschiedlichen Höhen des Strahlengangs befinden. In Wirklichkeit vertikal ausgerichtete Punkte im Sichtfeld erscheinen nicht mehr in einer Reihe.

Dieser Fehler entsteht, wenn das Objekt aus einem Neigungswinkel und nicht senkrecht betrachtet wird (Abbildung 3). Ein übliches Beispiel in der Mikroskopie ist die scheinbare Bewegung eines Strichkreuzes relativ zur Probe, bei der der Anwender den Kopf von einer Seite zur anderen bewegt. Der gleiche Effekt ist feststellbar, wenn ein Merkmal einer Probe gemessen wird, indem sie vor oder hinter die Kante eines Lineals oder Schieblehre gehalten wird. Dies führt zu einem Höhenversatz zwischen dem Objekt und der Messvorrichtung.

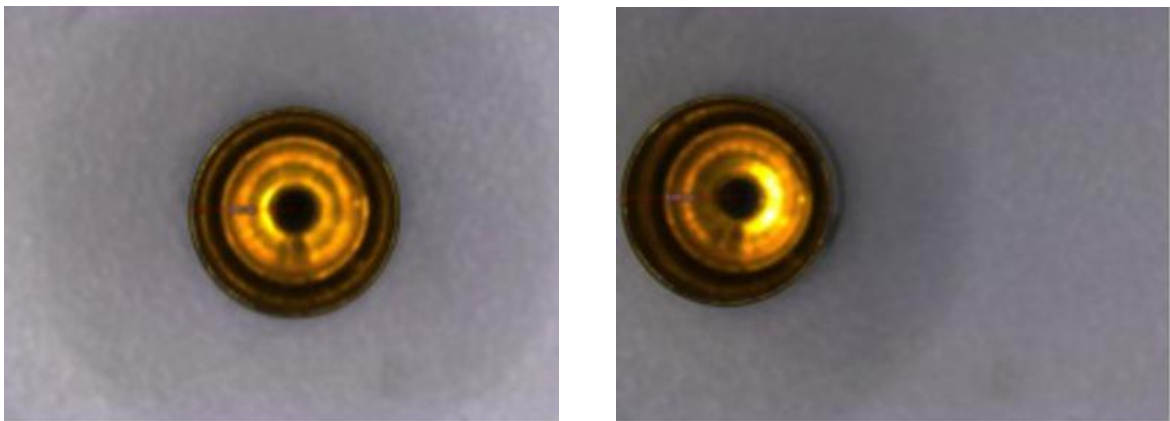


Abb. 3: Parallaxenfehler, der zu Messungenauigkeit führt. Im linken Bild ist die Patronenhülse im Sichtfeld zentriert, und der Messwert am Bildschirm lautet 4,62 mm von der Lochmitte (weit vom Objektiv) zur Hülsenkante (dicht am Objektiv). Im rechten Bild wird die gleiche Messung außermittig durchgeführt, und der abgelesene Wert ändert sich in 5,12 mm.

Parallaxenfehler führen auch dazu, dass Elemente, die aufrecht von der Oberfläche des Produkts abstehen, sich von der optischen Achse (der Mitte des Sichtfelds) weg zu neigen scheinen. Richtung und Größenordnung der scheinbaren Neigung variieren mit der Position des Elements im Sichtfeld (Abbildung 4). Diese Verzerrung erschwert reproduzierbare Tests, es sei denn, die Probe wird eingespannt, damit sie sich jedes Mal in genau derselben Position befindet.

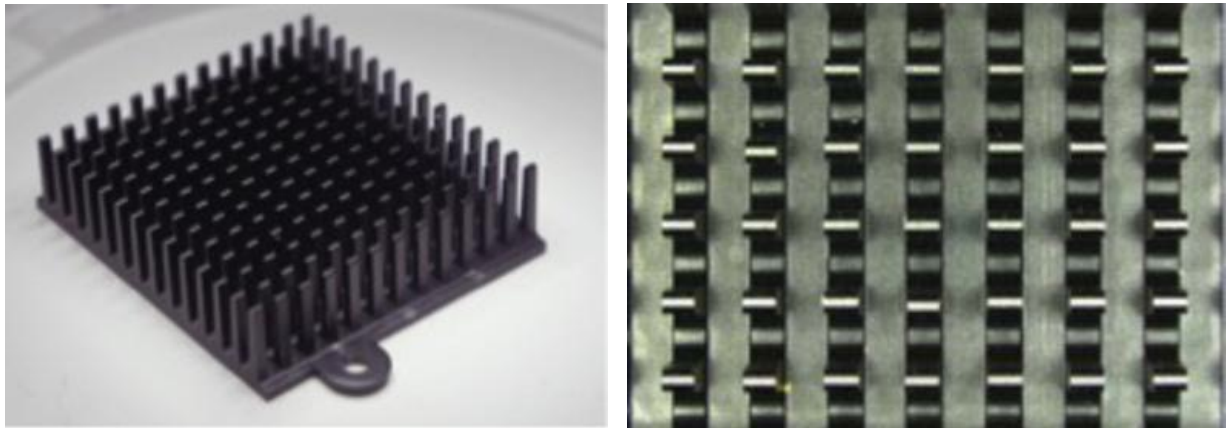


Abb. 4: Der Parallaxenfehler führt dazu, dass sich hohe Elemente (links) in der Draufsicht (rechts) von der Mitte des Sichtfelds weg zu neigen scheinen.

### Telezentrie bei modernen Mikroskopen

Bei so vielen Fehlerquellen aufgrund der Optik von Standardmikroskopen scheint es fast unmöglich, etwas zu prüfen, was eine quantitative Analyse erfordert. Allerdings kann ein Mikroskop, das optisch speziell dafür ausgelegt ist, diese Probleme vermeiden. Beispielsweise sind Mikroskope mit telezentrischer Optik erhältlich, die Ungenauigkeiten durch Vergrößerungs-, Zoom- oder Parallaxenfehler vermeiden oder drastisch reduzieren.

Telezentrische Linsen gibt es seit Jahrzehnten, aber sie galten eher als exotisch und allenfalls für ausgefallene Anwendungen geeignet. Erst mit dem zunehmenden Einsatz von bildgebenden Systemen und bildgestützten Qualitätsmessungen in der industriellen Fertigung wurde diese Technologie öfter eingesetzt.

Telezentrie ist eine Funktion eines optischen Systems, bei der alle Hauptstrahlen (der Mittelstrahl jedes Strahlenbündels), die das System passieren, sehr stark fokussiert werden und parallel zur optischen Achse sind. Ein optisches System kann im Bildbereich (Okular- / Kameraseite), im Objektbereich (Objektivseite) oder in beidem telezentrisch sein. Telezentrie wird erreicht, indem eine optische Blende, also ein lichtundurchlässiger Schirm mit einem kleinen Loch in der Mitte, in der hinteren Brennebene innerhalb des Linsensystems platziert wird (Abbildung 5).

Einfacher ausgedrückt sieht der Betrachter, wenn er ein Objekt durch eine telezentrische Linse betrachtet, „direkt nach unten“ auf alle Punkte im Sichtfeld. Mit nicht telezentrischer Optik sieht der Betrachter nur genau in der Mitte des Sichtfelds direkt nach unten und auf alle außermittigen Punkten in einem Winkel.

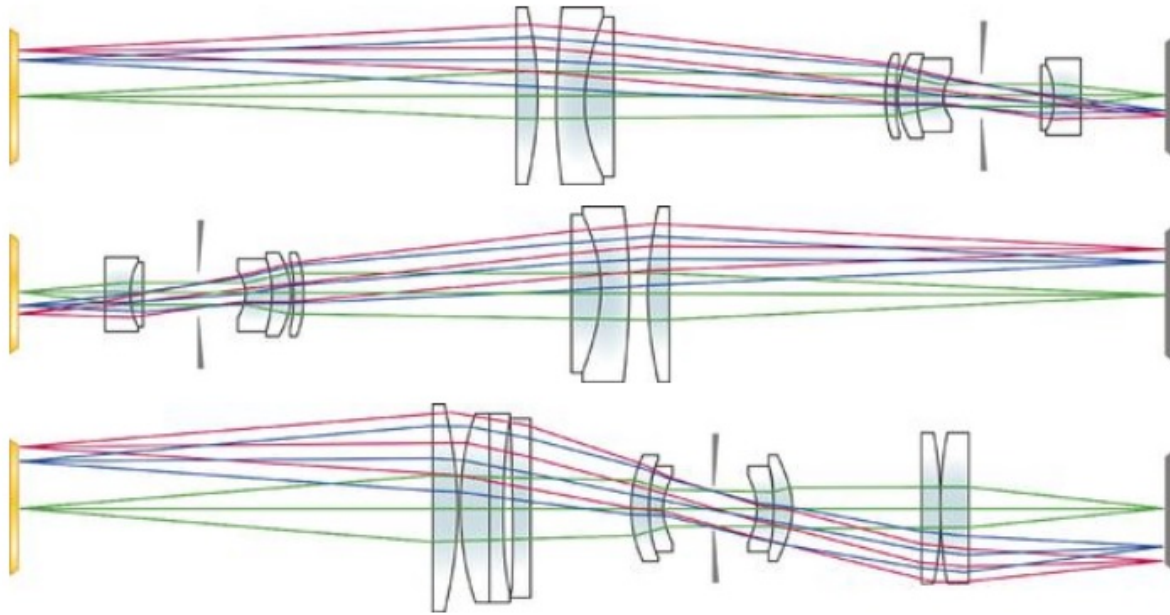


Abb. 5: Strahlenverläufe (Ray Trace) telezentrischer optischer Systeme. Die Hauptstrahlen sind parallel zur optischen Achse im Objektbereich (oben), im Bildbereich (Mitte) oder beidem (unten).

### **Vorteile der Telezentrie im Objektbereich (Objektivseite)**

Die telezentrische Auslegung eines Mikroskops verleiht dem System verschiedene optische Eigenschaften, die helfen, Verzerrungen zu reduzieren, die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit zu erhöhen.

#### **Konstante Vergrößerung**

Die wichtigste Eigenschaft des telezentrischen optischen Systems ist die konstante Vergrößerung bei variierendem Abstand zwischen der Probe und dem Mikroskopobjektiv. Dieses Konzept ist nicht so leicht verstehen, da wir nicht telezentrisch sehen. Für das menschliche Auge erscheinen nahe Objekte größer als weiter entfernte. Beim normalen Sehen funktioniert das gut; bei der Abbildung von Produkten, die in großer Zahl präzise vermessen müssen, ist eine konstante Vergrößerung jedoch entscheidend.

Eine konstante Vergrößerung sorgt für bessere Vergleichbarkeit bei der Prüfung von unterschiedlich hohen Proben, da sich die scheinbare Objektgröße nicht mit ihrem Abstand vom Objektiv ändert (Abbildung 6). Das ermöglicht zudem präzisere Messungen komplexer 3-D-Formen wie beispielsweise eines großen Bauteils zu, dessen Oberflächen auf unterschiedlichen Höhen liegen.

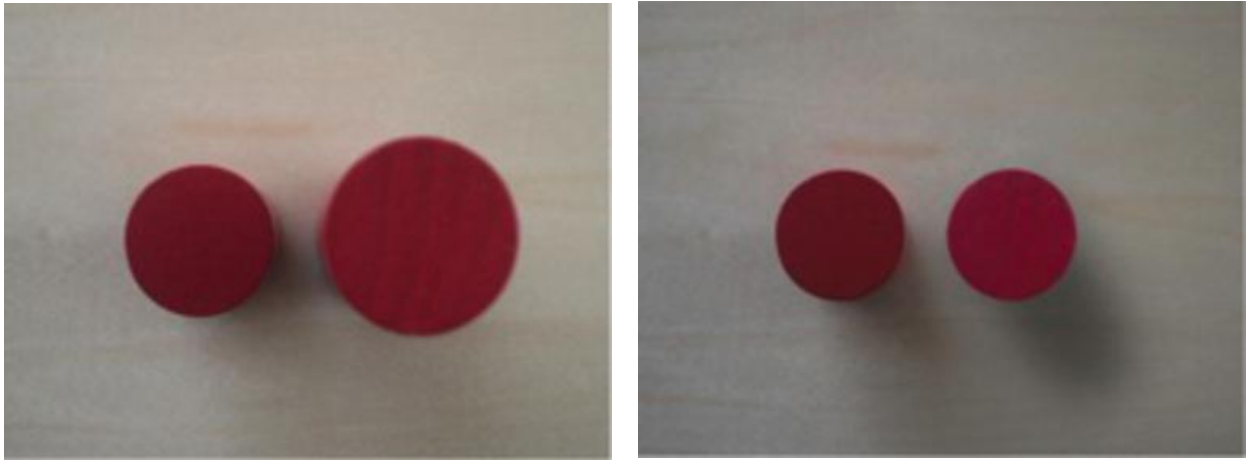


Abb. 6: Objekte desselben Durchmessers in verschiedenen Abständen von der Linse (aus Abbildung 2), wie durch Standard-Kameraoptik (links) und telezentrische Kameraoptik (rechts) gesehen.

Beim Messen von Elementen mit einem Strichkreuz oder einer Strichplatte am Bildschirm sorgt eine konstante Vergrößerung dafür, dass der Abstand zwischen Punkten eines hohen Elements nicht grösser erscheint als derselbe Abstand bei einem niedrigen Element. Auch lässt sich eine Probe reproduzierbar messen, die in verschiedenen Abständen zur Objektiv aufgenommen wird.

### Verbesserter Zoom

Ein wesentlicher Vorteil konstanter Vergrößerung liegt darin, dass sie wiederholbares und präzises Zoomen ermöglicht. Da telezentrische Linsen Vergrößerungsfehler praktisch beseitigen, minimieren sie unbeabsichtigte und unkontrollierte Variationen bei der Vergrößerung durch Bewegungen des Objektivs beim Zoomen und Fokussieren. Dadurch wird die optische Messgenauigkeit erheblich verbessert. In Kombination mit einer Rastfunktion zur mechanischen Positionierung oder einem codiertem Zoom können telezentrische Linsen eine Zoomfunktionalität bieten, die sowohl präzise als auch hochgradig wiederholbar ist.

### Symmetrische Unschärfe

Mit telezentrischer Optik lassen sich die Merkmale einer Probe präzise vermessen, selbst wenn sie sich außerhalb des Fokus befinden, denn Objekte, die sich nicht am Punkt des besten Fokus befinden, werden symmetrisch unscharf. Eine telezentrische Optik hält die zentrierte Position konstant und lässt die präzise Positionsberechnung von Merkmalen oder Kanten ohne Verzerrung zu. So muss der Anwender nicht mehr alle Punkte der Probe gleichzeitig im Fokus halten.



**Kein Parallaxenfehler (Perspektivenfehler)**

Parallaxenfehler zu vermeiden, ist äußerst wichtig, um präzise und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, insbesondere wenn mehrere Merkmale an verschiedenen Punkten eines dreidimensionalen Objekts untersucht werden (Abbildung 7). Mit Hilfe der telezentrischen Optik ändert sich die scheinbare Form und Position von Merkmalen am Objekt nicht, wenn das Objekt zu einem anderen Punkt im Sichtfeld bewegt wird oder wenn es später an einem anderen Ort untersucht wird.

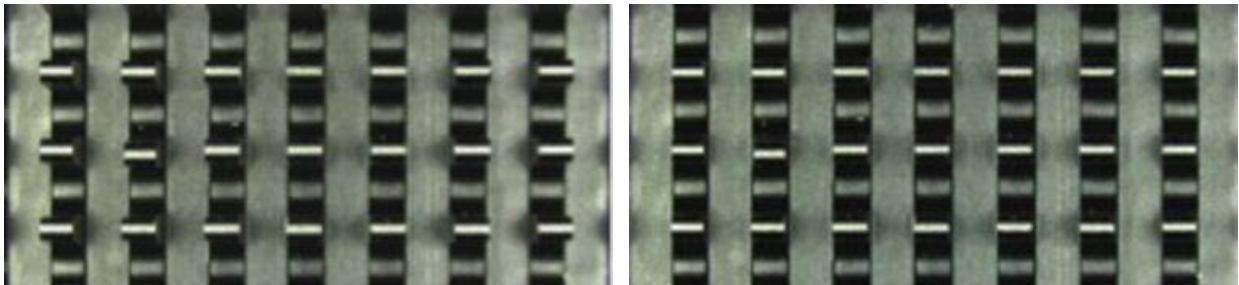


Abb. 7: Ein Vergleich hoher Elemente (aus Abbildung 4) beim Betrachten durch eine Standardoptik (links) und eine telezentrische Optik (rechts).

**Gleiche Blickachse zu allen Punkten im Sichtfeld**

Bei einer Standardoptik ist die Blickachse nur in der Mitte des Sichtfelds senkrecht zur Untersuchungsebene. Alle anderen Punkte werden aus einem Winkel betrachtet. Dies bedeutet, dass tiefliegende Elemente, die sich nicht mittig im Sichtfeld befinden, durch benachbarte hohe Elemente verdeckt werden können. Da die telezentrische Optik darauf ausgelegt ist, direkt nach unten auf alle Punkte im Sichtfeld zu schauen, tritt dieses Problem nicht auf. Das ermöglicht die präzise Visualisierung schwieriger Punkte wie beispielsweise der Innendurchmesser von zwei parallelen, weitauseinanderliegenden Rohren oder der Fußpunkt tiefer Löcher außerhalb der optischen Mittellinie (Abbildung 8).

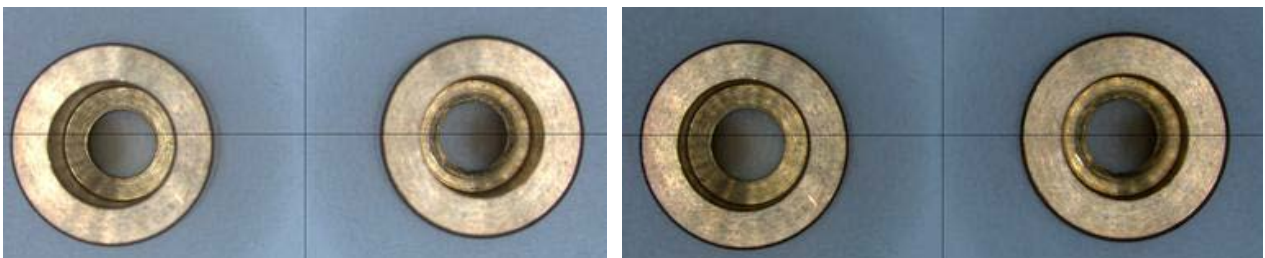


Abb. 8: Ein Vergleich der Ansichten schwieriger Formen betrachtet durch eine Standardoptik versus telezentrische Optik. Bei außermittiger Betrachtung durch eine Standardoptik sind die Blickachsen zu den Fußpunkten tiefer Löcher teilweise durch die Oberkanten der Löcher verdeckt (links). In der Ansicht mit telezentrischer Optik (rechts) ist die gesamte Fläche am Fußpunkt des Lochs sichtbar.

## Alternativen zu telezentrischen Linsen

### Software

Viele Anwender glauben, dass es mit Hilfe von Software möglich sei, das Bild zu justieren, um eine konstante Vergrößerung zu erzielen, und die oben beschriebenen Fehler zu vermeiden. Aber viele Vorteile telezentrischer Linsen lassen sich mit Software nicht genau reproduzieren.

### Zertifizierung und Kalibrierung optischer Systeme

Ein weiteres verbreitetes Missverständnis besteht darin, dass durch Dritte zertifizierte Mikroskopoptiken Präzision und Reproduzierbarkeit bei Probenmessungen garantieren. In Wirklichkeit zertifizieren staatliche Normungsorganisationen in der Regel die Kalibrierungsmittel, aber nicht einzelne Geräte.

Mikroskophersteller können interne Kalibrierungen an einzelnen Geräten vornehmen. Bei Mikroskopen mit manuellem Zoom, können die Kalibrierungsbedingungen im Feld allerdings nur schwer reproduziert werden. Kalibrierungen zum Zeitpunkt der Herstellung können zur Reproduzierbarkeit beitragen, indem sie die Leistung von Mikroskopen, die vom gleichen Anbieter hergestellt werden, konsistent halten und damit verbessern.

Allerdings kann keine Kalibrierung Fehler beseitigen, die durch grundlegende optische Prinzipien nicht-

telezentrischer Linsen hervorgerufen werden, wie beispielsweise Parallaxenfehler und nicht konstante Vergrößerung.

## Schlussfolgerung

Bilder, die selbst mit modernen optischen Systemen aufgenommen werden, können zu Fehlinterpretationen oder sogar zu falschen Messergebnissen führen. Deshalb sollte die Ausstattung eines Mikroskops sorgfältig überlegt werden. Mikroskope mit telezentrischen optischen Systemen helfen, viele dieser Fehler zu reduzieren oder zu vermeiden, und sorgen so für eine optimierte Bildqualität, Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

## Weiterführende Lektüre

Klein C., Buttermore W., Doppler M.: [Using Telecentric Optical Systems to Optimize Forensic Image Accuracy and Reproducibility - How to eliminate hidden errors in forensics](#), Leica Science Lab, July 2015

Gislao M. J., Smith C.: [Webinar: How More Accurate and Reproducible Measurements can be Made through Telecentricity](#), Leica Science Lab, June 2013

Leica Microsystems (Schweiz) Ltd. · Max-Schmidheiny-Straße 201 · 9435 Heerbrugg, Schweiz  
T +41 71 726 34 34 · F +41 71 726 34 44

[www.leica-microsystems.com](http://www.leica-microsystems.com)