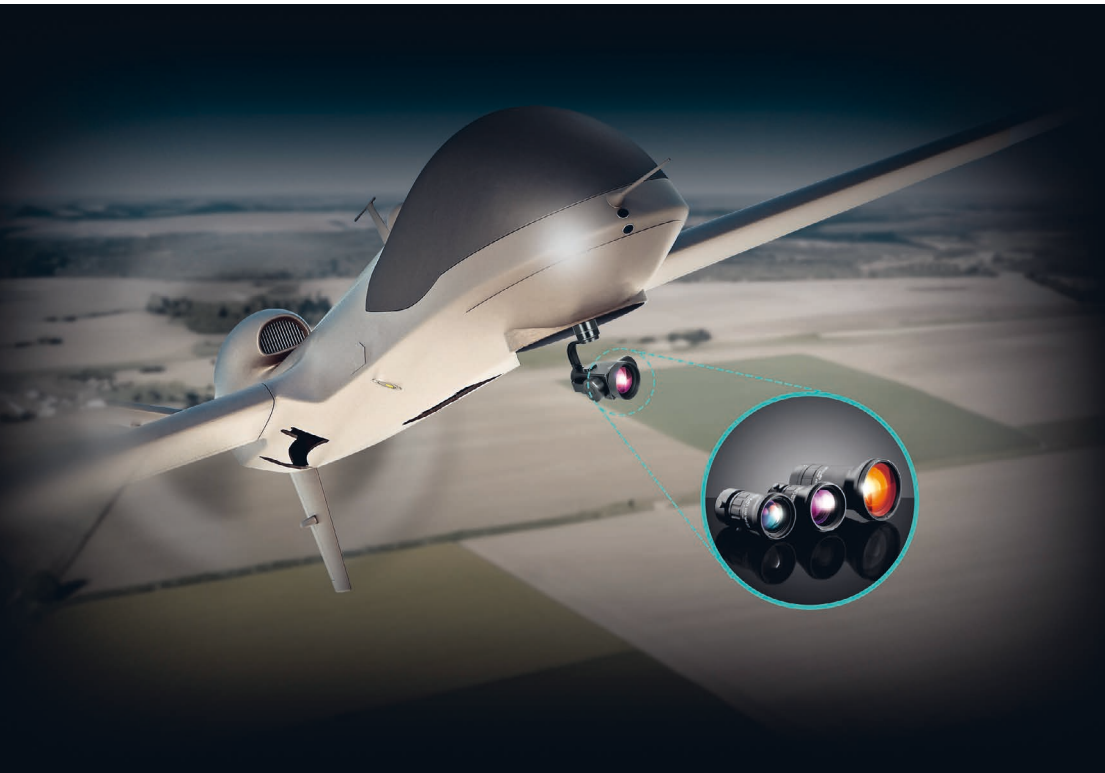


## Objektive für unbemannte Luftfahrzeuge



scheidend. Viele Anwendungen nutzen die Bildgebung von UAVs, um große Landflächen abzubilden, die Umwelt zu analysieren und verschiedenste nützliche Daten zu sammeln.

### Photogrammetrie

Bei der Photogrammetrie werden zum Beispiel überlappende 2D-Bilder kombiniert, um 3D-Gebiete zu kartieren. Die Bodenprobenentfernung (GSD), also die Höhe, in der die Luftbildphotogrammetrie stattfindet, hängt mit der Nyquist-Frequenz oder der bestmöglichen räumlichen Auflösung des Bildgebungssystems und der abzubildenden Objekte zusammen. [1] Ein hochauflösendes Bildgebungssystem ermöglicht den UAVs daher eine größere Flughöhe, was zu einem breiteren Sichtfeld und weniger Fotos führt, die aufgenommen werden müssen. Mit der derzeitigen militärischen Drohnentechnologie können Drohnenflüge bis zu 15,2 km

Die industrielle Bildverarbeitung ist längst nicht mehr auf die automatisierte Fertigungsumgebung beschränkt. Autonome Fahrzeuge, landwirtschaftliche Fahrzeuge, Drohnen und andere Roboter bringen hochauflösende Objektive in neue Umgebungen, von denen viele ganz andere Anforderungen stellen als herkömmliche Bildverarbeitungs-umgebungen. So wird die hochauflösende Bildgebung mit unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) immer beliebter für Kartierungen und Vermessungen, landwirtschaftliche Inspektionen, Photogrammetrie und vieles mehr.

### Neue Situation

Objektive für die UAV-Bildgebung sind ganz anderen Druck-, Temperatur-, Stoß- und Vibrationsbedingungen ausgesetzt als herkömmliche Bildverarbeitungsobjektive. Weder konventionelle Bildverarbeitungsobjektive noch die kleinen und günstigen Objektive der Drohnen für den privaten Einsatz eignen sich für die anspruchsvollen Aufgaben von UAVs mit festen Flügeln und anderen hochwertigen Robotersystemen. Hier werden spezielle Objektive benötigt.



Autor:  
Cory Boone  
Technical Marketing Manager  
www.edmundoptics.de  
Edmund Optics GmbH

### Einzigartige Anforderungen der UAV-Bildgebung

Bildgebende Systeme sind für die korrekte Positionierung, Lenkung und Datenerfassung von UAVs ent-

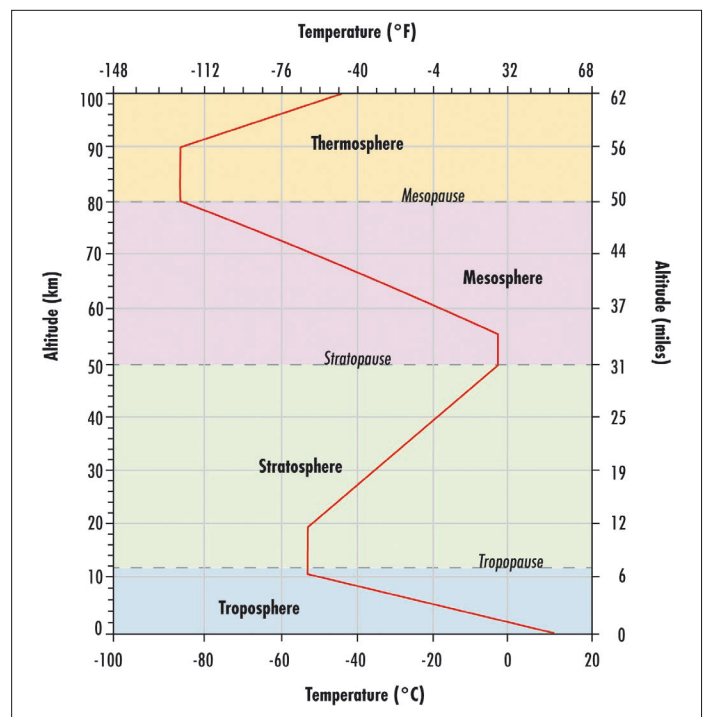
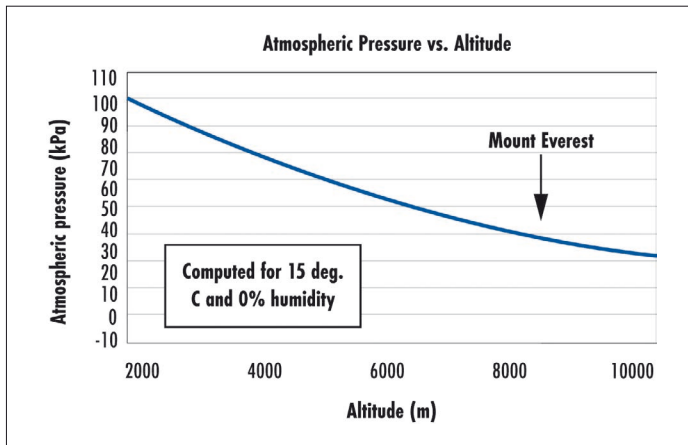


Bild 2: Temperaturschwankungen in der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe [3]



**Bild 3: Druckschwankungen in der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe [4]**

(50.000 Fuß) Höhe realisiert werden, was viele Herausforderungen für die Bildgebungssysteme mit sich bringt. [2] Temperatur und Druck können in diesen großen Höhen zwischen  $\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  bzw. 100 kPa und  $\sim 20\text{ kPa}$  schwanken (Bild 2).

Diese extremen Bedingungen können dazu führen, dass sich Elemente in der Objektivbaugruppe dezentrieren und verschieben, was die Auflösung/Genauigkeit beeinträchtigt und das Abbildungssystem zum limitierenden Faktor für die Systemleistung macht. Besonders für die Photogrammetrie ist es wichtig Wege zur Verbesserung der Bildverarbeitungssysteme zu finden, um die Leistungsfähigkeit weiter zu steigern.

## Multi- und hyperspektrale Bildgebung

Eine weitere wichtige Anwendung im Bereich der UAV-Bildgebung ist die Multi- und Hyperspektralbildgebung von Nutzpflanzen für die Landwirtschaft und die Umweltüberwachung. Bei der multispektralen Bildgebung werden Daten in mehreren separaten Wellenlängenbändern aufgezeichnet, während bei der hyperspektralen Bildgebung Daten über einen einzigen, großen, kontinuierlichen Wellenlängenbereich aufgezeichnet werden.

## Gleichgewicht herstellen

Die für die Photogrammetrie erörterten Grundsätze der GSD gelten auch für diese Anwendungen, aber bei der multi- und hyperspektralen Bildgebung gibt es auch eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge, was die Herausforderungen für die Abbildungsoptik weiter verkompliziert.

Optikdesigner müssen nun ein Gleichgewicht zwischen der Arbeit in einem sehr breiten Wellenlängenbereich und der Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen sowie der Beibehaltung einer hohen Auflösung finden. Die spektrale Auflösung eines Systems ist die kleinste Größe der Wellenlängenbereiche, die das System unterscheiden kann. Die multispektrale Bildgebung hat eine geringere spektrale Auflösung als die hyperspektrale Bildgebung, ist aber einfacher zu entwickeln und in der Regel kostengünstiger. Die Auswahl der spektralen Bildgebungsmethode hängt von der Einsatzsituation ab. Viele Vegetationsarten weisen bei bestimmten Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Spektrums sehr unterschiedliche Eigenschaften auf (Bild 4).

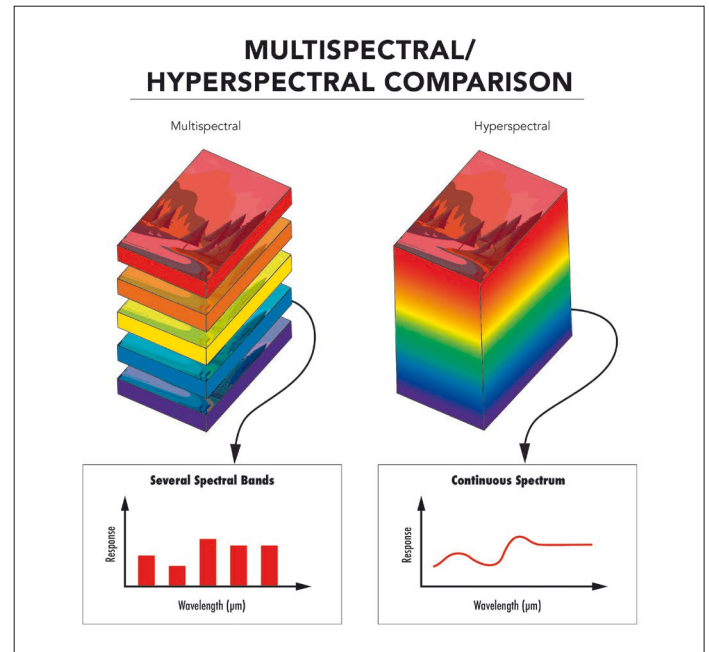
## Zusätzliche Anwendungen

Im zivilen Bereich werden UAVs im Bereich Katastrophenhilfe, Archäologie und Bergbau eingesetzt, indem sie z. B. Photogrammetrie und Umweltbildgebung nutzen, um Zeit und Arbeit zu sparen.

## Kurze Geschichte der UAV-Bildgebung

Bei der Einführung von Bildverarbeitungssystemen für die Fertigungsautomatisierung wurden C-Mount-Objektive aus dem Sicherheitsbereich zweckentfremdet. Für Drohnen und autonome mobile Roboter (AMR) werden Objektive aus dem Bereich der Fertigungsautomatisierung wiederverwendet, aber die Objektive sind für diese Robotersysteme nicht ideal.

Bei der UAV-Bildgebung werden immer höhere Auflösungen ange-



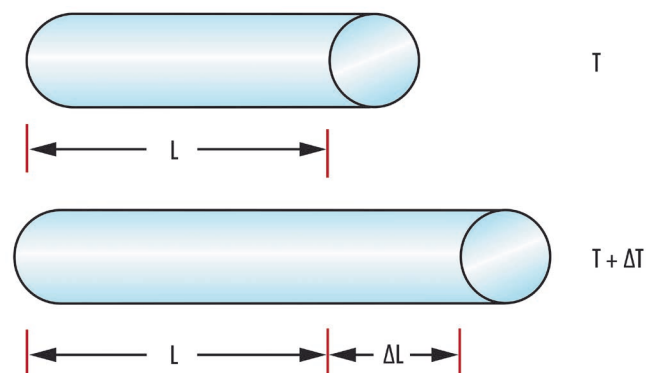
**Bild 4: Der Unterschied zwischen Multispektral- und Hyperspektralbildgebung ist eine diskrete bzw. kontinuierliche Darstellung der Wellenlängeninformationen.**

strebt und neueste, hochauflösende Bildsensoren wie die 4. Generation des Sony Pregius 1,2" IMX530 und IMX540 eingesetzt. Die C-Mount-Objektive, die aus der Fertigungsautomatisierung übernommen wurden, sind zu groß, zu schwer und anfällig für Leistungseinbußen aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen, denen UAVs ausgesetzt sind, und somit nicht ideal geeignet.

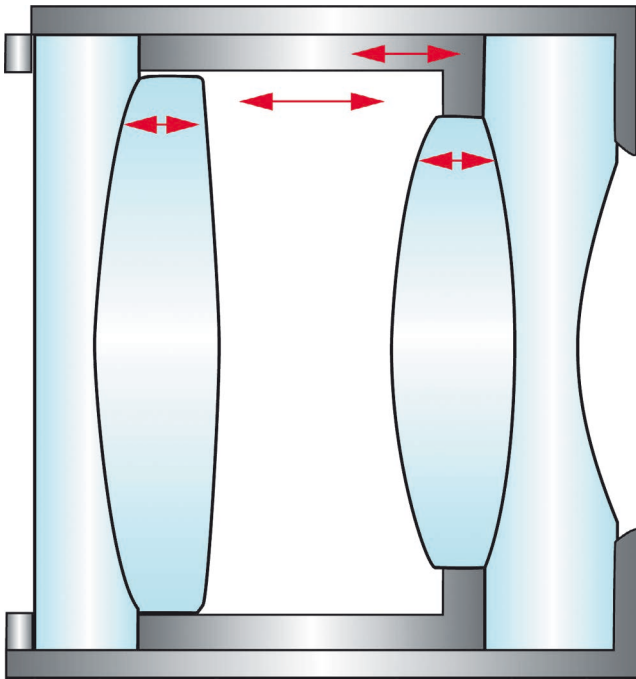
Andererseits können die kleinen, kompakten Objektive, die häufig in kommerziellen Drohnen verwendet werden, nicht hoch genug auflösen,

um die Vorteile der neuen Sensoren voll auszunutzen, sodass die hohe Sensorauflösung wieder beschränkt würde.

Je höher die Auflösung, desto größer, schwerer und komplexer sind typischerweise die Objektive. Die Objektive der UAV-Serie hingegen haben eine sehr kompakte Größe und erreichen trotzdem 24,6 Megapixel Auflösung bei Sensoren mit  $2,74\text{ }\mu\text{m}$  Pixelgröße. Die Objektive werden im nachfolgenden Abschnitt über UAV-Objektive von Edmund Optics näher beschrieben.



**Bild 5: Änderungen der Temperatur ( $\Delta T$ ) bewirken eine Änderung der Länge eines Materials ( $\Delta L$ ), die vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials abhängt. In Wirklichkeit findet diese Ausdehnung jedoch in allen drei Raumdimensionen statt und nicht nur linear in einer Dimension, wie hier dargestellt.**



**Bild 6: Kompensationen von Verkleinerung und Ausdehnung in einem streng athermischen Design**

## Robuste UAV-Objektive für raue Umgebungen

Wie bereits erwähnt, beeinträchtigen die Höhe und die Geschwindigkeit der UAVs die Leistung der Objektive. Temperaturänderungen führen zu Änderungen der physikalischen Größe von Objekten in Abhängigkeit von ihrem Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK). Glas und Metall dehnen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen WAKs unterschiedlich schnell aus oder ziehen sich zusammen (Bild 5).

## Herausforderungen

Die unterschiedlichen WAKs von Glas und Metall in einer Abbildungsbaugruppe können dazu führen, dass sich die Elemente im Objektiv verschieben, neigen oder generell falsch ausgerichtet werden oder sogar bei Erwärmung oder Abkühlung Risse bekommen. All diese Effekte verringern die Abbildungsleistung. Der Brechungsindex der Linsen ändert sich ebenfalls mit der Temperatur, aber die Auswirkungen dieses Phänomens beeinträchtigen die Systemleistung weniger als die Änderung der Größe aufgrund der thermischen Ausdehnung.

Ziel ist es also, die Verschiebung der Elemente der Linsenbaugruppe zu reduzieren und die Empfindlich-

keit der Linse gegenüber Ausrichtungsfehlern zu verringern.

## System robuster machen

Wenn die Linsenbaugruppe so aufgebaut ist, dass manche Elemente die Änderungen ausgleichen, wenn sich alle Elemente gleich ausdehnen und zusammenziehen, wird eine Fehlausrichtung der einzelnen Elemente durch thermische Effekte verhin-

dert (Bild 6). Diese Art von athermalisiertem Objektivdesign ist deutlich zeitaufwändiger, aber sie gewährleistet eine gleichmäßige Leistung über einen bestimmten Temperaturbereich.

## Sich ändernden Druck berücksichtigen

Beim Design von Objektiven für UAV-Anwendungen muss auch der sich ändernde Druck in Abhängigkeit von der Flughöhe berücksichtigt werden. Während des Optikdesigns muss die Luft innerhalb und außerhalb des Objektivs bei unterschiedlichen Druckwerten in einer Simulationssoftware genau modelliert werden, um die Auswirkungen auf das Objektiv vorherzusagen und ein endgültiges Design zu erstellen, das diese Druckverschiebungen tolerieren kann.

Aufgrund der schnellen Beschleunigungen, denen UAVs ausgesetzt sind, müssen die Baugruppen unter Umständen auch so robust sein, dass sie bei Erschütterungen und Vibrationen eine stabile Ausrichtung beibehalten, das heißt, dass ein Punkt auf dem abzubildenden Objekt stets demselben Punkt auf dem Kamerasensor zugeordnet wird. Diese Robustheit wird erreicht, indem die Optomechanik optimiert, die Anzahl der beweglichen Teile reduziert und die einzelnen Linsenelemente verklebt werden, um zu verhindern, dass sie sich im Linsentubus verschieben und eine Fehlausrichtung verursachen.

## Schutz vor Partikeln und Feuchtigkeit

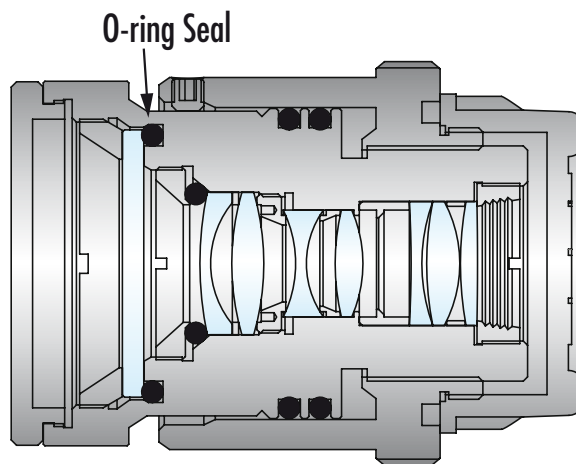
Des Weiteren kann ein Schutz gegen das Eindringen von Partikeln und Feuchtigkeit in die Linsenbaugruppe sinnvoll sein. Staub und Wasser würden die Leistung des Objektivs beeinträchtigen, da das auf diese Partikel treffende Licht abgelenkt wird. Dieser Effekt lässt sich abmildern, indem die Elemente im Innern des Objektivtubus mit Dichtungsringen abgedichtet werden oder indem die Luft im Innern eines Objektivs während der Montage abgesaugt und durch ein inertes Gas ersetzt wird (Bild 7). Durch diese Maßnahme werden Partikel aus dem Inneren der Linse entfernt und Partikel von außen können nicht mehr in das Innere der Linse gelangen.

## Schutz vor Wasser

Dieser Schutz gegen das Eindringen von Wasser hilft auch Kondenswasser auf den Linsen zu verhindern. Wenn in einer Baugruppe Feuchtigkeit vorhanden ist, können Wasserpartikel sehr leicht an den Linsen haften bleiben und die auf die Linsen treffenden Lichtstrahlen ablenken. Dies beeinträchtigt die Systemleistung erheblich und stellt ein großes Problem dar, wenn Bildgebungssysteme bei niedrigen Temperaturen, wie sie in großen Höhen herrschen, eingesetzt werden. Wie Bild 7 zeigt, kann die Kondensation durch ein hydrophobes Fenster auf der Vorderseite der Baugruppe weiter abgemildert werden.

## Literatur

1. Wawrzyn, D. (2023, August 3). What is Ground Sample Distance and How Does it Affect Your Drone Data? Propeller. <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/>
2. Leslie, J. (2023). How High Can a Drone Fly? Drone Survey Services. <https://dronesurvey.com/can-you-fly-a-drone-in-a-public-park-in-the-uk/>
3. Miller, C. (2021, April 15). Human Responses to High Altitude. Pressbooks. <https://humanbiology.pressbooks.tru.ca/chapter/8-8-human-responses-to-high-altitude/>
4. Mihalcea, G. (2023). Why are binoculars filled with nitrogen gas? Expert Binoculars. <https://expertbinoculars.com/why-are-binoculars-filled-with-nitrogen-gas/> ◀



**Bild 7: Die gegen Verschmutzungen geschützten Objektive sind versiegelt, um Feuchtigkeit, Staub und andere Verunreinigungen von außen fernzuhalten.**