

Auf dem Weg zur optimalen Bildqualität

Moderne Digitalobjektive für verstellbare Fachkameras

Was ist anders in der digitalen Fotografie?
Welche neue Anforderungen müssen die Objektive erfüllen?
Begrenzt der Sensor oder das Objektiv die Bildschärfe?
Wie zukunftssicher sind unsere aktuellen Digitalobjektive?

Technisch perfekte und konkurrenzlos scharfe Fotos
mit unverkennbar professioneller Anmutung



Architektur

Foto: Ferit Kuyas

Höchste Detailschärfe, brillanter Kontrast, geringstmögliche Verzeichnung, Farbsaumfreiheit an kontrastreichen Kanten und ein großer Bildkreis zur Perspektivkorrektur (Behebung oder Abschwächung „stürzender Linien“) sind in der Architekturfotografie unverzichtbare Eigenschaften. Solche Anforderungen können nur verstellbare Fachkameras in Verbindung mit hochauflösenden Digitalrückteilen und mit professionellen Digitalobjektiven erfüllen.



Industrie

Foto: Raymond Meier

Genau dieselben Eigenschaften sind auch in der Industriefotografie nötig, und deshalb dominieren auch hier verstellbare Fachkameras mit Digitalrückteilen und Digitalobjektiven.



Landschaft

Foto: Julian Calverley

In der Landschaftsfotografie, z. B. für großformatige Bildbände, wird höchste Detailschärfe verlangt, was hochauflösende Digitalrückteile und Objektive erfordert. Dagegen sind Korrekturen der Perspektive selten oder nur in geringem Maße erforderlich. Dennoch ist ein großer Bildkreis wichtig: Aufnahmen extremer räumlicher Tiefe verlangen maximale Schärfentiefe, die durch eine Objektivschwenkung nach Scheimpflug ohne übermäßiges Abblenden und somit ohne schärfemindernde Beugung möglich wird. Diese Objektivschwenkung benötigt ebenfalls einen deutlich erweiterten Bildkreis.



Kunst

Foto: Raymond Meier

In der Kunst muss alles erlaubt sein, auch Unschärfe. Doch kommt es z. B. auf präzise Darstellung von Oberflächenstrukturen an, so ist höchstes Auflösungsvermögen nötig. Dann liefern verstellbare Fachkameras mit Objektiven mit großem Bildkreis neue Freiheitsgrade für die Bildgestaltung.

Die souveräne Beherrschung der Perspektive und die Schärfentiefeverlagerung verstellbarer Kameras sowie die extrem hohe Auflösung professioneller Digitalrückteile und Digitalobjektive sind wichtige Erfolgs-Voraussetzungen

Verstellbare Fachkameras korrigieren die Perspektive und erweitern die Schärfentiefe ohne zusätzliche Abblendung



Vertikalshift mit Weitwinkel- und Standardobjektiven

In der Porträt-, Mode-, Sport- oder Reportagefotografie werden SLR-Kameras bevorzugt, in anderen Bereichen der professionellen Fotografie jedoch sind verstellbare Fachkameras nötig. Sie erlauben die perfekte Kontrolle über die Perspektive und Schärfentiefe. Ihre Digitalrückteile mit großen Sensorformaten sowie komplexerer Elektronik und Software sind in Auflösung, Farbtreue und Rauschfreiheit den Sensoren von Kleinbild-SLR-Kameras weit überlegen.

Allerdings sind Höchstleistungen nur dann zu erreichen, wenn auch die verwendeten **Objektive** beste Schärfe bis zu den Bildecken, hohen Kontrast sowie Freiheit von Farbsäumen und von Verzeichnung bieten.

Die zum Teil auch ohne Stativ einsetzbaren Architektur-Kameras ermöglichen die Entzerrung stürzender Linien.



Sachfotografie, Stilleben, Food

(Anzeigen- und sonstige Produktwerbung, Kataloge, Prospekte, Sachbücher)

Architektur-, Industrie- und Luftbildfotografie

Landschaftsfotografie

(Bildbände, Postkarten, Poster, Touristikwerbung)

Künstlerische Fotografie



Vertikal- und Horizontalshift, Scheimpflug-Schwenkung und große Brennweiten-/Auszugsflexibilität

Fachkameras auf optischer Bank sind das Werkzeug professioneller Fotografen.



Ein größerer Sensor mit höherer Auflösung allein genügt anspruchsvollen Profi-Fotografen nicht, Kameras und Objektive müssen auch Parallelverschiebung und Scheimpflug-Schwenkung erlauben

Direkte oder indirekte Parallelverschiebung ermöglicht das Entzerren stürzender Linien mit korrekten Proportionen

Parallelverschiebung zur Kontrolle der Perspektive

- Beseitigung stürzender Linien bei Auf- oder Untersicht, z.B. bei Sach- und bei Architekturaufnahmen.
- Unverzerrte Darstellung trotz eines seitlichen Standorts, z.B. wegen eines Hindernisses vor dem Motiv.
- Vermeidung störender Spiegelbildern bei Glas-, Lack u.ä. glänzenden Flächen.
- Streckung oder Stauchung von Gegenständen aus ästhetischen Gründen, z.B. bei Fotos von Schuhen oder Autos.

Bild A - starre Kamera

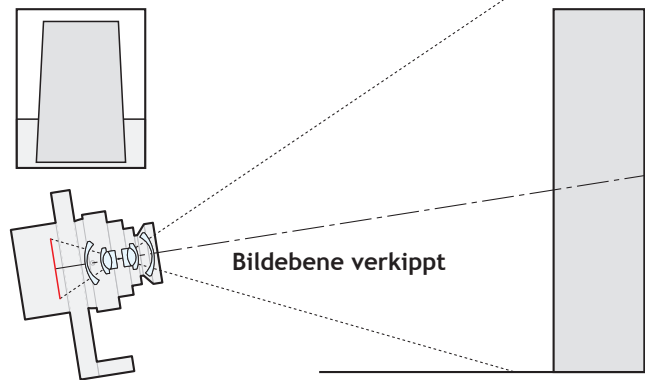


Bild B - starre Kamera

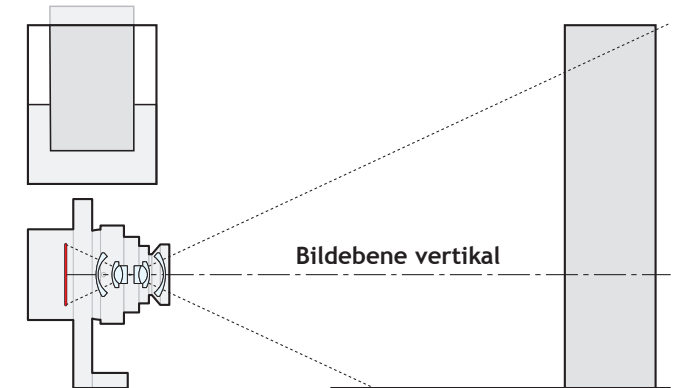


Bild C - verstellbare Kamera

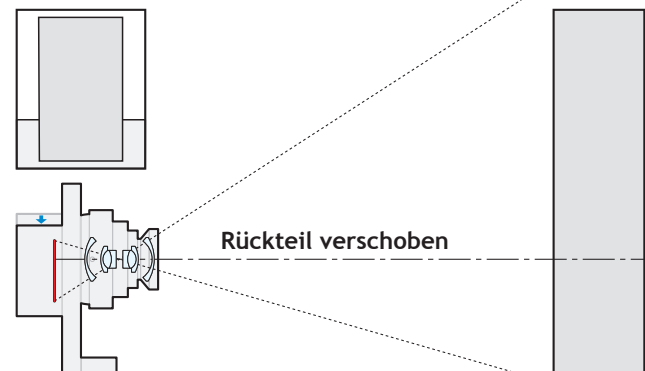
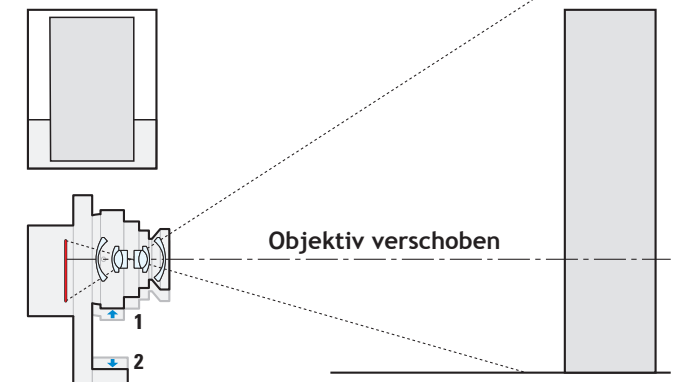


Bild D - verstellbare Kamera



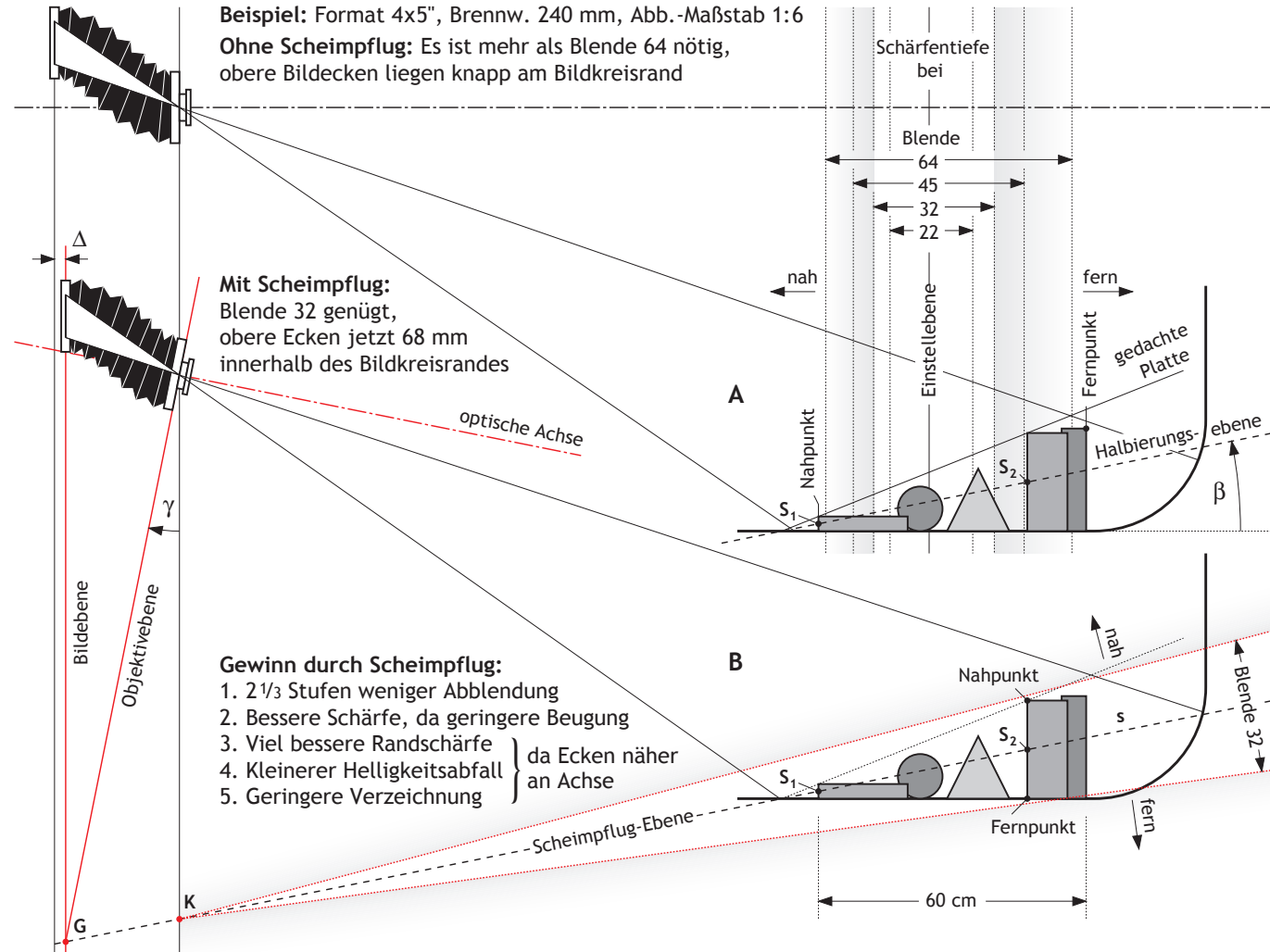
Die Verschiebung ist mit dem Rückteil oder mit dem Objektiv möglich. Bei der Rückteilverschiebung bleiben Vordergrund und Hintergrund relativ zueinander unverändert, während sich bei Verschiebung des Objektivs (1) Vorder- und Hintergrund in der Höhe relativ zueinander verschieben. Das ist aber durch entgegengesetzte Verschiebung der Kamera (2) kompensierbar.

Das Entzerren stürzender Linien bei der Aufnahme durch Parallelverschiebung dauert nur wenige Sekunden, nachträgliches Entzerren dauert länger und verfälscht fast immer die Proportionen (Breite zu Höhe der Gegenstände)

Scheimpflug-Objektivschwenkung passt die Schärfentiefe so an das Motiv an, dass weniger abgeblendet werden muss und bessere Schärfe erzielt wird

Mit Scheimpflugschwenkung muss weniger abgeblendet werden

- Die Schwenkung des Objektivs kann bei Anpassung der Schärfentiefe-Zone an die räumliche Ausdehnung des Motivs übermäßiges Abblenden verhindern.
- Mit weniger Abblendung vermindert sich die physikalisch bedingte Beugung, was deutlich schärfere Fotos ermöglicht.
- Die Schärfe verbessert sich zusätzlich, wenn bei Scheimpflug-Schwenkung mit Parallelverschiebung (zur Vermeidung stürzender Linien) das Motiv wieder näher in die Bildkreismitte rückt.
- Manchmal kann bei entgegengesetzter Schwenkung („Anti-Scheimpflug“) auch die Schärfentiefe eingeschränkt werden.

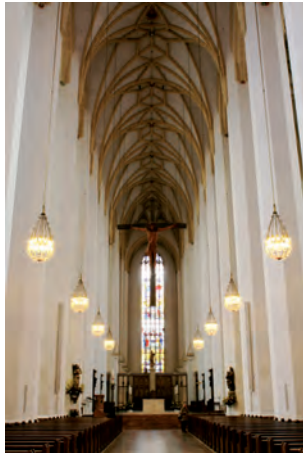


Die nebenstehende Darstellung ist exakt maßstäblich; die Lage aller Punkte und Linien sowie der Schwenkwinkel γ wurden mathematisch berechnet.

Schärfentiefe-Anpassung an das Motivs ist nur mit Objektivschwenk bei der Aufnahme und nicht später am Computer möglich; der auf den erste Blick ähnlich wirkende „Miniatureffekt“ wird durch künstliche Unschärfe, nicht erweiterte Schärfe erzielt

Kann man nicht auch nachträglich noch am Computer entzerren?
 Ja, aber es ist schwierig, wenn die Proportionen wieder stimmen sollen

Aufnahme
 mit schräg
 aufwärts
 gerichteter
 Kamera



Stürzende Linien



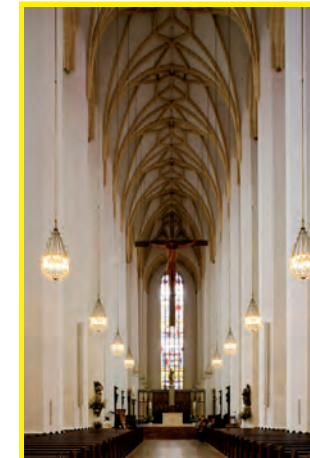
zu schmal!

Unten stauchen?



zu breit!

Oder oben verbreitern?

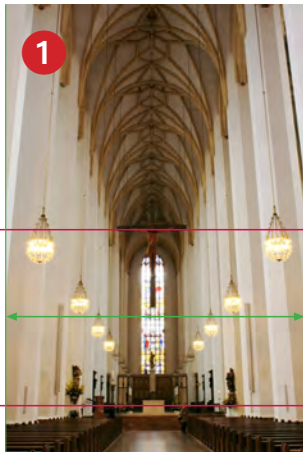


Aufnahme
 mit hoch-
 verstelltem
 Objektiv
 ist korrekt

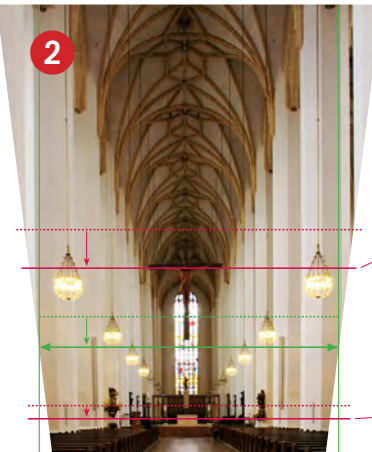
Mit verstellbarer
 Kamera entzerrt

Entzerrung mit Photoshop® in 3 Schritten

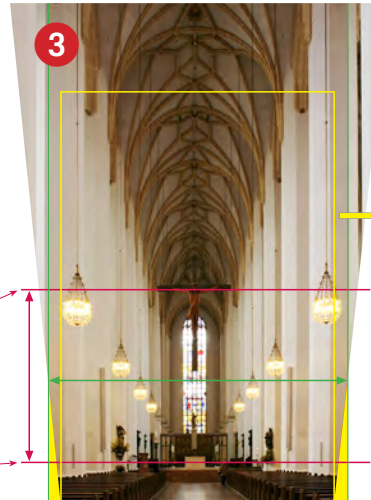
Mühsame
 Prozedur
 bei der
 Entzerrung



1



2



3



Nutzbares
 Bildformat
 (gelb) ist
 17% kleiner

Werden stürzenden Linien einfach senkrecht gestellt, stimmt das Verhältnis von Breite zu Höhe nicht mehr; nachträglich wieder die richtigen Proportionen zu finden, ist ein schwieriges und zeitraubendes Unterfangen

Es gibt eine geometrische Beweisführung für die Möglichkeit einer nachträglichen korrekten Entzerrung am Computer

Unverzerrte Aufnahme

Bei zur Fassade paralleler Bildebene gibt es keine stürzenden Linien, aber das Gebäude ist oben angeschnitten

Kamera
H'
Achse =
Richtung zum Horizont H

Stürzende Linien

Bei verkippter Kamera ist das ganze Gebäude im Bild, aber nun trapezförmig verzerrt

Kamera
H'
M'
Achse = Richtung zur Bildmitte
Richtung zum Horizont H

Parallelverschiebung

Dabei wieder zur Fassade parallele Bildebene, aber jetzt ganzes Gebäude auf dem Bild

Kamera
H'
Achse =
Richtung zum Horizont H

Trick: Winkelhalbierende

Vertikaler Abstand HM (I) und Breite bei W (o) sind in beiden Aufnahmen genau gleich groß

Kamera
H'
M'
Richtung zur Bildmitte
Winkelhalbierende
Richtung zum Horizont H

Gleiche Strecken

Foto unverzerrt
Foto verzerrt
Gelbes und blau umrandetes Dreieck sind spiegelsymmetrisch

H'
90°
W'
90°
M'
H'
M'
H
M

Das ist die Bedingung:

M'
Gleiche Höhe
W'
Gleiche Breite
H'

Immer wenn sich die Horizontlinie (in Augen- bzw. Kamerahöhe) im schräg aufgenommenen Foto feststellen lässt, kann diese zu korrekt maßstäblichen Bildern ohne stürzende Linien führende Entzerrungsmethode angewandt werden

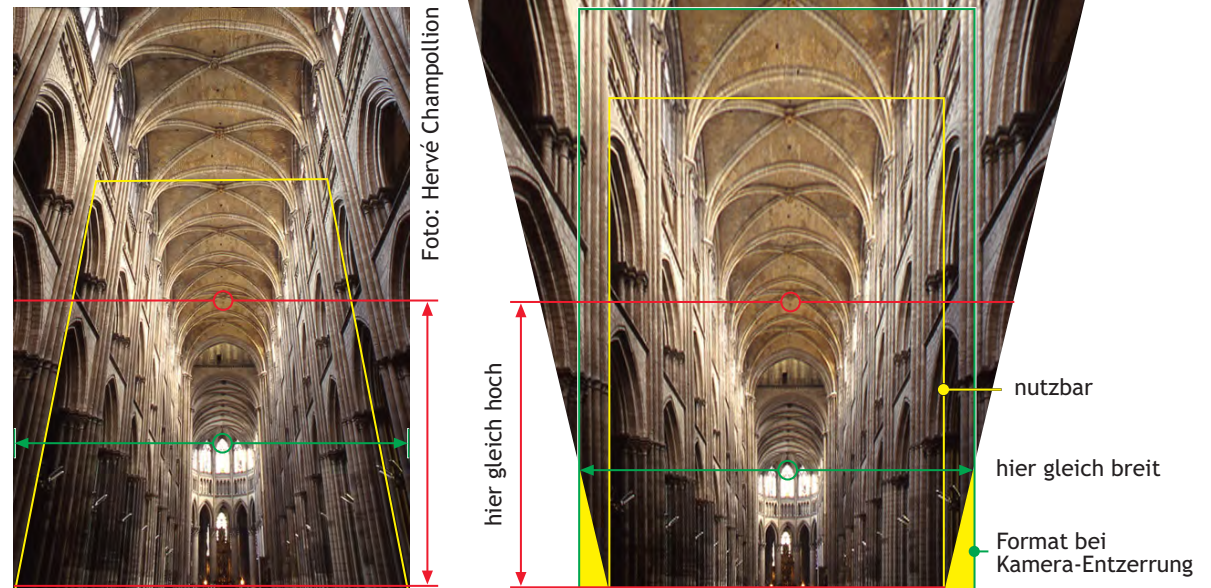
Nachteile des Entzerrrens am Computer mit Photoshop®

1. sehr viel größerer Zeitaufwand
2. kleinerer nutzbarer Bildausschnitt
3. gewaltiger Qualitätsverlust

In diesem Bildbeispiel ging 44 % der Fläche und somit der Pixel verloren. Allein schon deshalb sinkt die Auflösung erheblich.

So verbleiben z. B. bei **22 Megapixel** nur noch **12,3 Megapixel** in dem nach der Entzerrung nutzbaren trapezförmigen Ausschnitt (gelber Rahmen). Am oberen Rand dieses Ausschnitts sinkt die Schärfe jedoch durch Vergrößerung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung (infolge der Entzerrung des Trapezes zum Rechteck), da die originalen Bildpunkte quasi auseinandergezogen werden, auf das Niveau einer Aufnahme mit nur **10,5 Megapixel!** Dazu kommt dann noch der Qualitätsverlust aufgrund der anschließenden Interpolation, da alle Pixel im Pixelraster liegen müssen.

Das linke Ausgangsfoto mit den stürzenden Linien wurde für diesen Qualitätsvergleich vor dem Entzerrren auf so niedrige Auflösung umgerechnet, dass es in der Beamerprojektion gerade noch scharf wirkt. Daher zeigt das mit Photoshop® entzerrte rechte Bild hier deutlich die entstandene Unschärfe.



Wer glaubt, auf die Entzerrung stürzender Linien mit Kameraverstellungen verzichten zu können, weil es auch mit dem Computer geht, der erzielt mit viel mehr Zeitaufwand ein sehr viel schlechteres Ergebnis

Die professionelle digitale Fotografie stellt neue Anforderungen an Kamera, Aufzeichnungsmedium (Sensor statt Film) und Objektiv

Auch mit der alten Fachkamera und ihren Objektiven kann man digital fotografieren. Aber so wird man die Bildqualität aktueller Digitaltechnik nicht annähernd erzielen, da Sensor und Film sehr verschieden sind.

1. Die Sensoren haben kleinere Formate

Die Sensorformate sind kleiner als die professionellen Filmformate. Die Kameras sowie ihre Verstellwege und Schwenkwinkel dürfen kleiner sein, während ihre Präzision höher sein muss. Die Objektive haben kürzere Brennweiten und kleinere Bildkreise, aber müssen eine höhere Auflösung bieten.

2. Die Sensorfläche ist fast perfekt eben

Anders als beim Film ist die lichtempfindliche Oberfläche beim Sensor perfekt plan. Eine bessere Bildfeldebnung der Objektive führt zu sichtbar besserer Bildschärfe.

3. Schutz- und Filterglas vor dem Sensor

Weil der Sensor auch auf Infrarotstrahlung reagiert, ist ein Infrarot-Sperrfilter nötig, das zugleich mechanischen Schutz bietet. Das ca. 2 mm dicke Glas verursacht jedoch Abbildungsfehler (Unschärfe und Farbsäume). Neue Digitalobjektive können speziell zu deren Kompensation korrigiert werden.

4. Das Schutz- und Filterglas spiegelt

Das stärker als die Filmschicht spiegelnde Glas erzeugt mehr Streulicht und eventuell

sogar Geisterbilder. Deshalb muss die Vergütung der Objektive verbessert werden.

5. Mikrolinsen verstärken Vignettierung

Zur Empfindlichkeitssteigerung werden oft Mikrolinsen vor den Pixeln verwendet, die am Bildrand einen Helligkeitsabfall verursachen. Digitalobjektive mit vergrößerter Schnittweite verhindern diesen Fehler.

6. Regulärer Pixelraster erzeugt Moiré

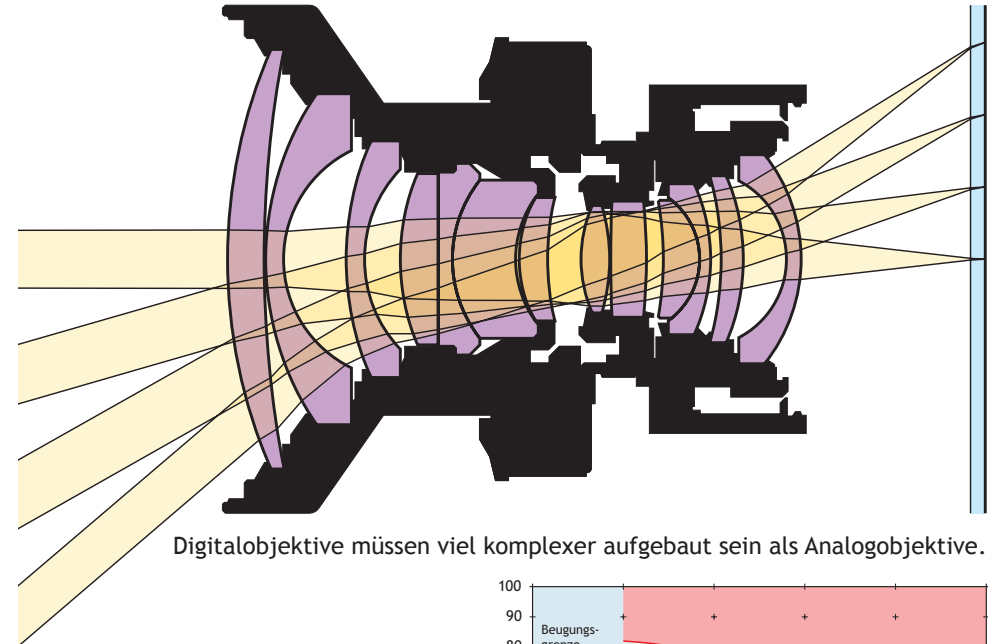
Während die Größe und Abstände des Filmkorns variieren, sind beim Sensor alle Pixel gleich groß und in einem rechtwinkligen Raster angeordnet. Das führt bei sehr feinen regelmäßigen Bildstrukturen zu Moiré.

7. Bayer-Farbfilter erzeugt Farbrauschen

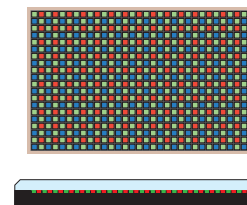
Die schachbrettähnliche Farbenanordnung im Bayer-Filter ist ebenfalls Ursache für Moiré und erfordert Interpolation. Beides führt zu einem deutlichen Farbrauschen.

8. Sensor- kontra Objektiv-Auflösung?

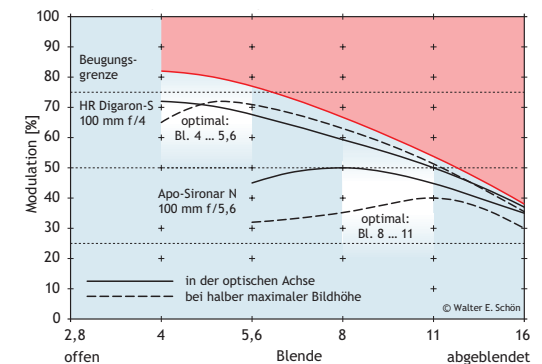
Die Bildschärfe wird von der Auflösung des Objektivs und des Sensors begrenzt. Doch das Optimum wird nicht erreicht, wenn die Pixelrasterweite gleich dem Beugungsscheibchendurchmesser ist. Vielmehr gilt, dass die Schärfe mit kleiner werdender Pixelrasterweite zunimmt, bis diese etwa 1/4 des Beugungsscheibchendurchmessers beträgt: Die Schwachstelle ist der Sensor!



Digitalobjektive müssen viel komplexer aufgebaut sein als Analogobjektive.



Die anderen Eigenschaften des Sensors stellen höhere Ansprüche an das Objektiv.



Keinere Formate und höhere Auflösung erfordern Höchstleistung bei großer Öffnung.

Der Sensor eines Digitalrückteils unterscheidet sich so stark vom herkömmlichen Film, dass für optimale Bildergebnisse andere Kameras und spezielle Digitalobjektive nötig werden

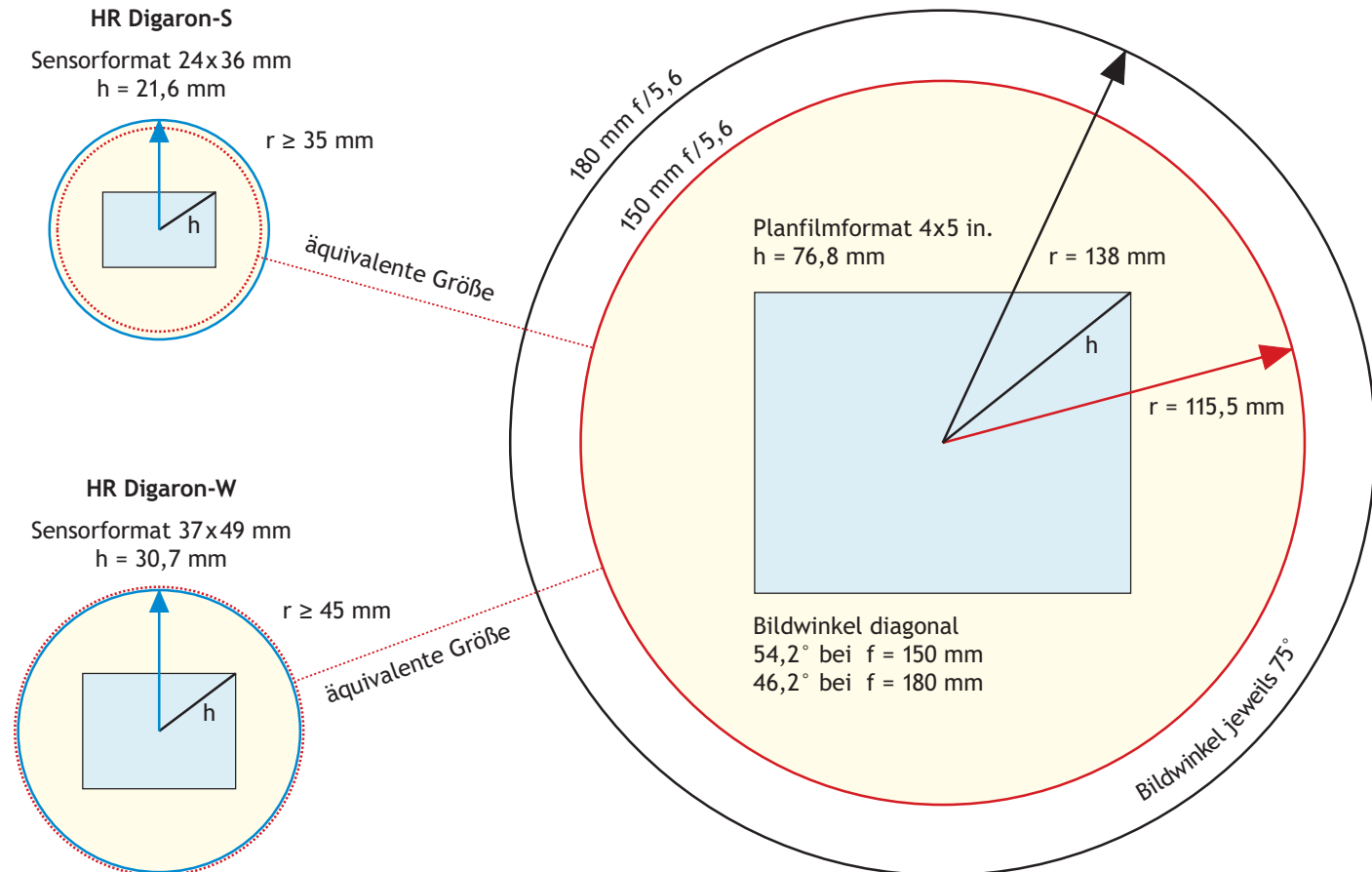
Die Sensorformate sind kleiner als die klassischen Planfilmformate, aber für Kameraverstellungen ist auch hier ein übergroßer Bildkreis nötig

Sensorformate und Bildkreisgrößen

Die Sensorformate professioneller Digitalrückteile sind sehr viel kleiner als das früher übliche Planfilmformat 4x5 in. Aktuelle Standardformate sind 24x36 mm und 37x49 mm. Seltener sind Zwischenformate um 33x44 mm und für höchste Ansprüche an das Auflösungsvermögen die größten Sensorformate 36x56 mm und 40x54 mm. Somit liegt die Sensorfläche zwischen 8% (Format 24x36 mm) und 19% (40x54 mm) der Fläche des Planfilmformats 4x5 in. Trotzdem wird eine vergleichbare, wenn nicht bessere Bildschärfe erwartet. Das stellt unglaubliche hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen der Objektive.

Die Objektivserien HR Digaron-S für kleinere und HR Digaron-W für größere Sensorformate haben nicht mehr 6 bis 8 Linsen wie herkömmliche Großformatobjektive, sondern bis zu 15 Linsen! Damit erreichen sie nicht nur eine extrem hohe Auflösung (weshalb die MFT-Kurven jetzt für bis zu 80 Linienpaare pro Millimeter* angegeben werden), sondern bieten auch große Bildkreise über die Formatgröße hinaus, das vergleichbare Kameraverstellungen wie früher bei Aufnahmen mit den Planfilmformaten für die Parallelverschiebung und Scheimpflug-Schwenkung möglich sind.

* Im analogen Kleinbildformat war eine Angabe bis maximal nur 40 Lp/mm üblich.



Die Rodenstock-Digitalobjektive HR Digaron-S und HR Digaron-W bieten relativ zur Sensorgröße übergroße Bildkreise und dennoch nicht nur im Zentrum, sondern bis zum Rand hohen Kontrast und überragendes Auflösungsvermögen

Kleinere Formate erlauben weniger Abblendung für gleiche Schärfentiefe und verlangen weniger Abblendung zur Vermeidung störender Beugung

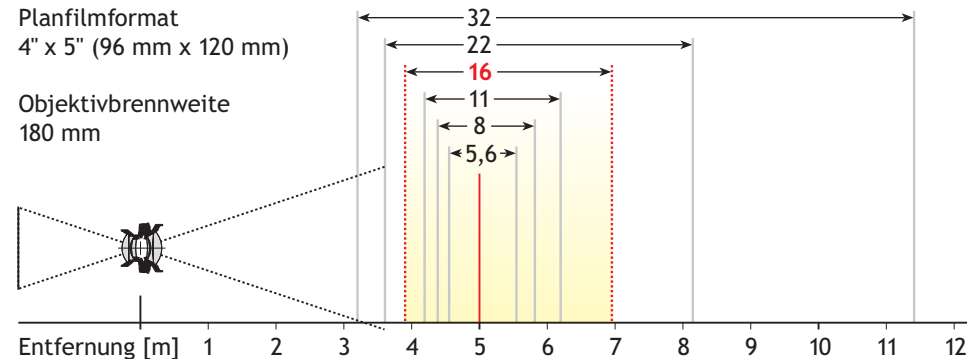
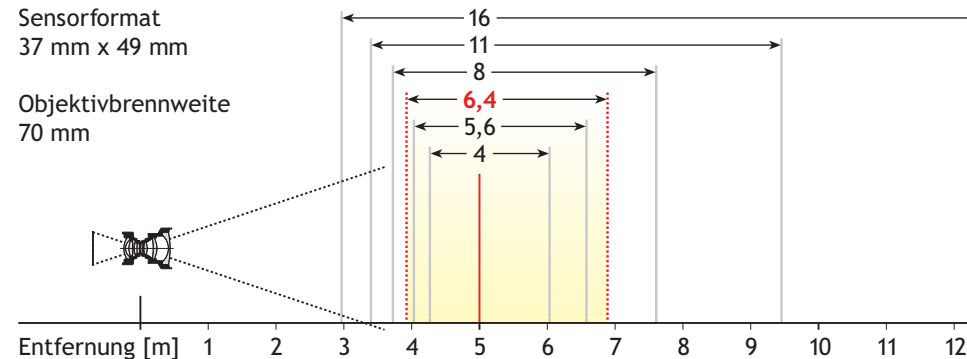
Brennweite proportional zum Format

Um mit einem kleineren Aufnahmeformat vom gleichen Standort den gleichen Motivausschnitt wie mit einem größeren Format aufzunehmen, ist eine kürzere Brennweite erforderlich. Äquivalente Brennweiten für die verschiedenen Formate müssen zu den Formatdiagonalen proportional sein.

Die kürzeren Brennweiten bei kleineren Sensorformaten liefern größere Schärfentiefe. Also darf man die Blende für gleiche Schärfentiefe weiter öffnen. Mathematisch lässt sich beweisen, dass die für gleiche Schärfentiefe in beiden Aufnahmeformaten erforderlichen Blendenzahlen wie die jeweiligen Brennweiten zu den Formatdiagonalen proportional sind (siehe Tabelle).

Wegen der bei kleinerem Format geringeren zulässigen Unschärfe wirkt sich die beim Abblenden zunehmende Beugung viel früher aus. Deshalb muss man die Blende weiter öffnen. Die mathematische Berechnung zeigt, dass auch hier die für gleiche Beugung im Endergebnis erforderlichen Blendenzahlen zu den Formatdiagonalen proportional sind (siehe Tabelle).

Die Digitalobjektive müssen also schon bei großen Blendenöffnungen höchste Abbildungsleistung bringen, damit die bei den kleineren Sensorformaten nötigen größeren Öffnungen tatsächlich einsetzbar sind.



Äquivalente Brennweiten sichern gleichen Bildwinkel bzw. gleichen Motivausschnitt.
 Äquivalente Blendenzahlen sichern gleiche Schärfentiefe und gleiche Beugung.

Identische Beugungsunschärfe und auch gleiche Schärfentiefe ergeben sich für

Planfilm	bei Blende					
4x5 in.	8	11	16	22	32	45
Sensoren	bei Blende					
24x36 mm	2,3	3,2	4,5	6,4	9	13
33x44 mm	2,8	4	5,6	8	11	16
37x49 mm	3,2	4,5	6,4	9	13	18
40x54 mm	3,5	4,8	7	9,7	14	20

Wichtige Regel:

Nie stärker abblenden, als es für die benötigte Schärfentiefe sein muss.

Scheimpflug bringt oft 2 bis 3 Blendenstufen.

kritischer Bereich

Bei kleinen Sensorformaten wird bereits ab Blende 8 - 11 störende Beugungsunschärfe sichtbar, aber die größere Schärfentiefe erlaubt es auch, weniger abzublenzen als früher bei Planfilmaufnahmen

Wegen der kleinen Digitalformate muss schon bei geringer Abblendung eine extrem hohe Abbildungsleistung gewährleistet sein

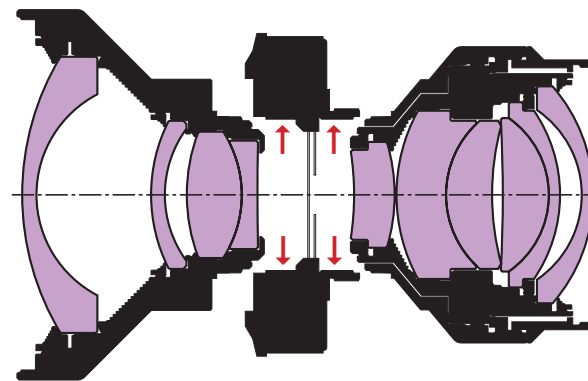
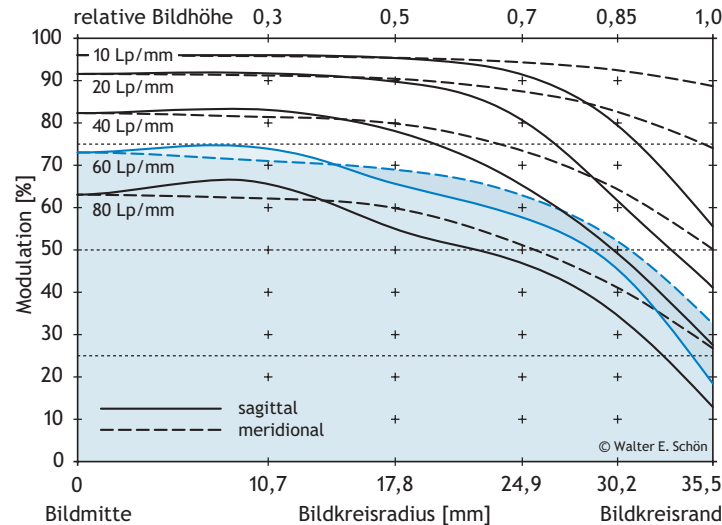
Schärfer trotz kleinerer Bildfläche

Um das extrem hohe Auflösungsvermögen der Sensoren aktueller Digitalrückteile für mindestens gleiche, wenn nicht bessere Schärfe als bei Planfilmaufnahmen zu nutzen, müssen die Digitalobjektive höchste Leistung zeigen. Das wird durch die Forderung erschwert, schon bei großen Blendenöffnungen beste Schärfe zu erzielen.

Die Digitalobjektivserien HR Digaron-S und HR Digaron-W wurden darum kompromisslos auf höchste Bildqualität schon bei großen Blendenöffnungen getrimmt. Der außergewöhnlich hohe konstruktive Aufwand in Optik und Mechanik, eng limitierte Fertigungstoleranzen sowie eine Justiermöglichkeit des Hinterglieds nach dem Einbau in den Verschluss (doppelte Fassung – siehe rechts unten) haben zu exzellenten Ergebnissen geführt, wie hier ihre MTF-Kurven zeigen (MTF = Modulation Transfer Function = Kontrastübertragungsfunktion):

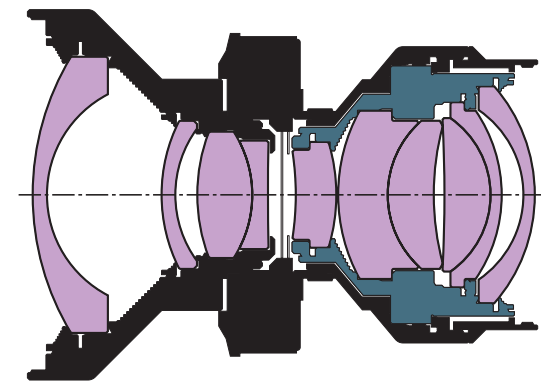
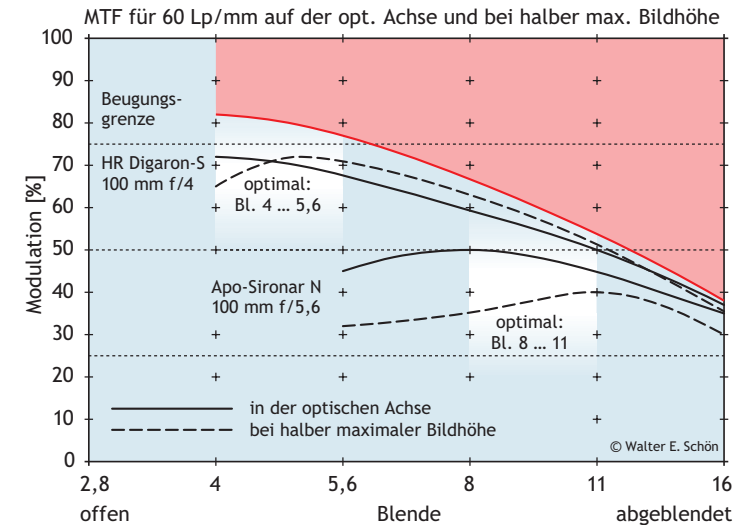
Während die besten herkömmlichen Großformatobjektive ihre optimale Leistung im zentralen Bereich zwischen Blende 8 und 11 und nahe dem Bildkreisrand ab Blende 16 liefern, erreichen die besten Digitalobjektive ihr Optimum im zentralen Bereich zwischen Blende 4 und 5,6 sowie am Bildkreisrad bei Blende 8. Damit erfüllen sie die obige Forderung perfekt. Über Blende 8 wird das Auflösungsvermögen nur noch von unvermeidbarer Beugung begrenzt.

MTF-Kurven des HR Digaron-S 60 mm f/4 bei Blende 5,6



Die Verschlussgewinde bringen schädliche Toleranzen ins Spiel, ...

MTF-Vergleich herkömmlicher und neuer Objektive



... die durch Justage der Innenfassung behoben werden können

Die Rodenstock-Digitalobjektive HR Digaron-S und HR Digaron-W sind nicht nur abgeblendet schärfer, sondern bereits bei offener Blende, damit die physikalisch unvermeidbare Beugung minimal bleibt

Während der Film (ohne Saugplatte) mangelhafte Planlage zeigt, ist die Sensoroberfläche eines Digitalrückteils perfekt eben

Ebener Sensor verlangt ebenes Bild

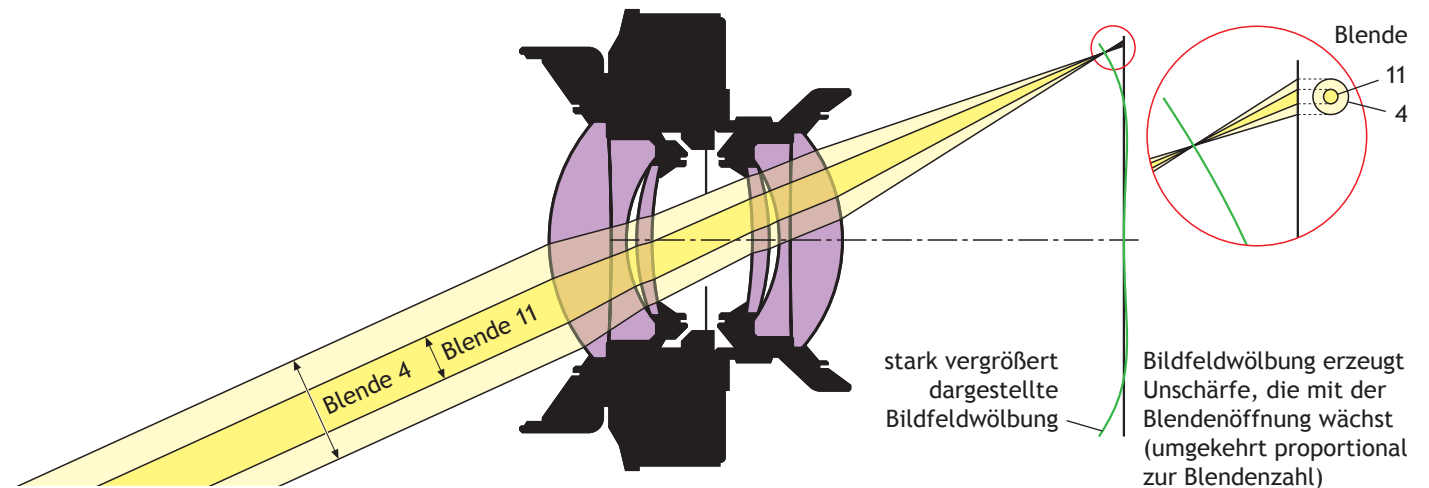
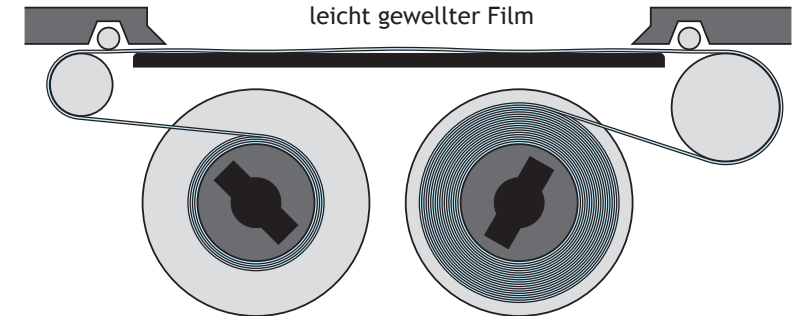
Fotos sind eben, und auch in der Optik gilt die ebene Bildfläche als Idealfall. Tatsächlich aber weist jedes Objektiv eine mehr oder weniger starke Bildfeldwölbung auf, deren Form etwa einer Untertasse ähnelt (grüne Kurve in der Zeichnung rechts unten; die Wölbung ist zur Verdeutlichung stark übertrieben). Der Objektivkonstrukteur wird immer versuchen, diese Bildfeldwölbung möglichst klein zu halten.

Gute Bildfeldebnung erfordert allerdings erheblichen konstruktiven Aufwand. Weil der Film nie perfekt eben liegt, sofern er nicht mit einer Saugplatte „gewaltsam“ plan gehalten wird (wie z. B. bei Luftbild- und Vermessungskameras), wurde die Bildfeldebnung stets nur so weit getrieben, bis die Abweichungen knapp unter denen des Films lagen (einige zehntel Millimeter!). Eine weitergehende Bildfeldebnung wäre sehr viel teurer geworden, ohne dass sie die Schärfe sichtbar gesteigert hätte.

In der Digitalfotografie ist die Sensoroberfläche jedoch nahezu perfekt eben. Daher führt eine bessere Bildfeldebnung der Objektivs zu gleichmäßigerer Schärfe von der Mitte bis zu den Ecken des Bildformats.

Bessere Bildfeldebnung ist in der Digitalfotografie auch aus einem zweiten Grund wichtig: Wegen der bei kleineren Aufnahmeformaten größeren Schärfentiefe darf und zur Vermeidung von Beugungsunschärfe muss weniger abgeblendet werden. Das aber würde bei stärkerer Bildfeldwölbung zu störender Randunschärfe führen.

Beide Digitalobjektivserien HR Digaron-S und HR Digaron-W wurden deshalb für eine hervorragende Bildfeldebnung korrigiert.



Ein höherer Aufwand zur verbesserten Korrektur der Bildfeldwölbung lohnt sich jetzt; beim Film dagegen waren die Abweichungen von der idealen Planlage zu groß

Das Schutz- und Filterglas von ca. 2 mm Dicke vor dem Sensor verursacht sichtbare Aberrationen, die zu korrigieren sind

Korrektion der Schutzglasaberration

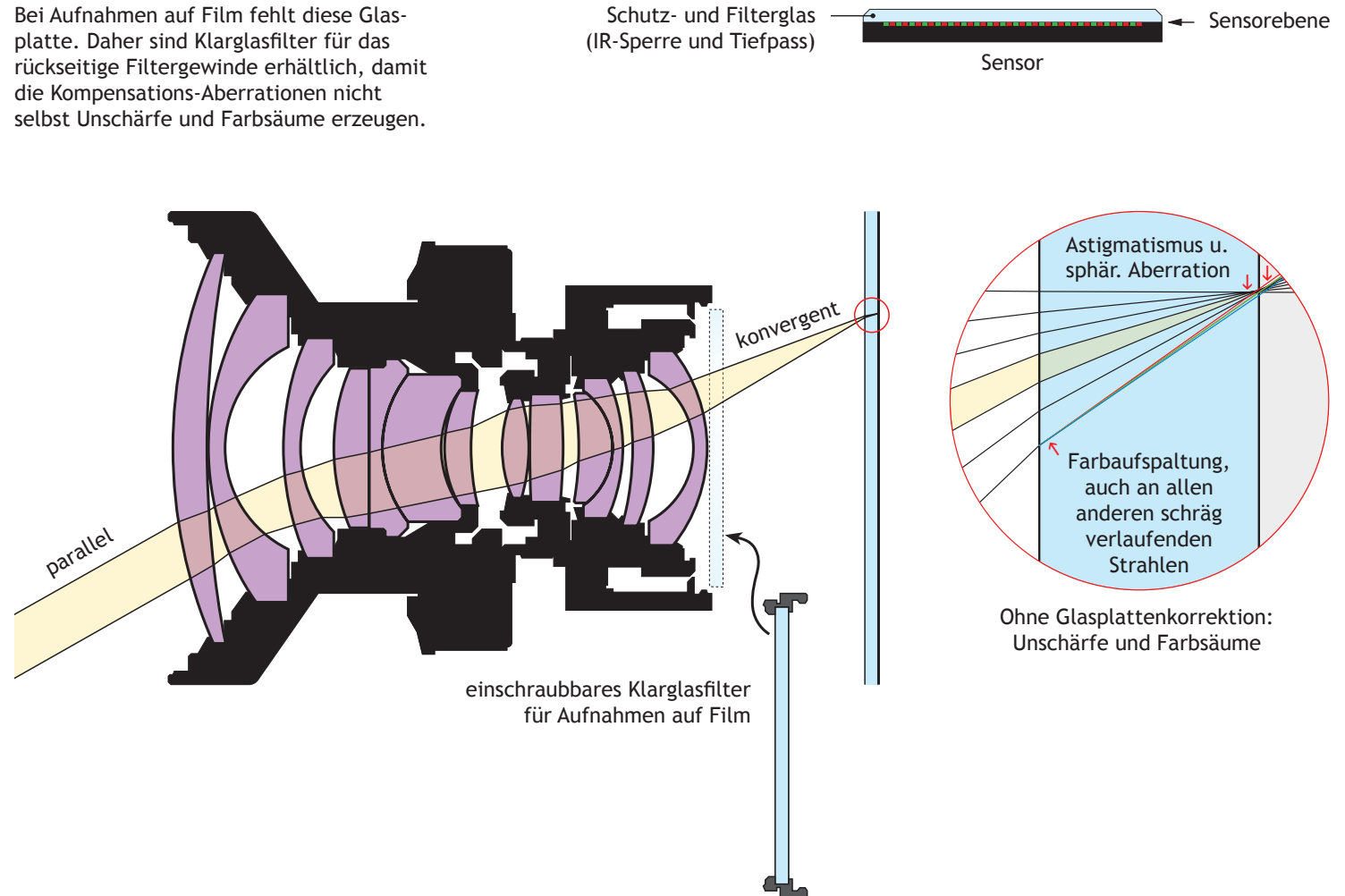
Im Gegensatz zum Film hat der Sensor vor seiner lichtempfindlichen Oberfläche eine ca. 2 mm dicke Glasplatte. Sie dient einerseits als mechanischer Schutz und andererseits als Infrarot-Sperrfilter (Sensoren von Digitalrückteilen haben eine hohe IR-Empfindlichkeit, die unterdrückt werden muss). Die Platte kann auch ein Tiefpassfilter zur Unterdrückung von Artefakten enthalten.

Eine planparallele, perfekt glatte und homogene Filter-Glasplatte dieser Dicke vor dem Objektiv hat keine negative Wirkung, weil die von jedem Punkt eintreffenden Lichtstrahlen (nahezu) parallel verlaufen.

Aber das Schutz- und Filterglas des Sensors liegt hinter dem Objektiv im konvergen-ten, d.h. kegelförmig im Bildpunkt zusammenlaufenden Strahlengang. Das erzeugt Abbildungsfehler, nämlich Astigmatismus, sphärische und chromatische Aberration, also Unschärfe und schwache Farbsäume.

Beim HR Digaron-S und HR Digaron-W ist die Optikrechnung so ausgelegt, dass die vom Schutz- und IR-Filterglas des Sensors verursachten Aberrationen durch entgegengesetzt gerichtete des Objektivs kompensiert werden. Das steigert die Schärfe und gewährleistet farbsaumfreie Bilder.

Bei Aufnahmen auf Film fehlt diese Glasplatte. Daher sind Klarglasfilter für das rückseitige Filtergewinde erhältlich, damit die Kompensations-Aberrationen nicht selbst Unschärfe und Farbsäume erzeugen.



Das dicke Schutzglas verursacht Astigmatismus sowie sphärische und chromatische Aberration, die für hochauflösende Sensoren in der Optikrechnung korrigiert werden müssen

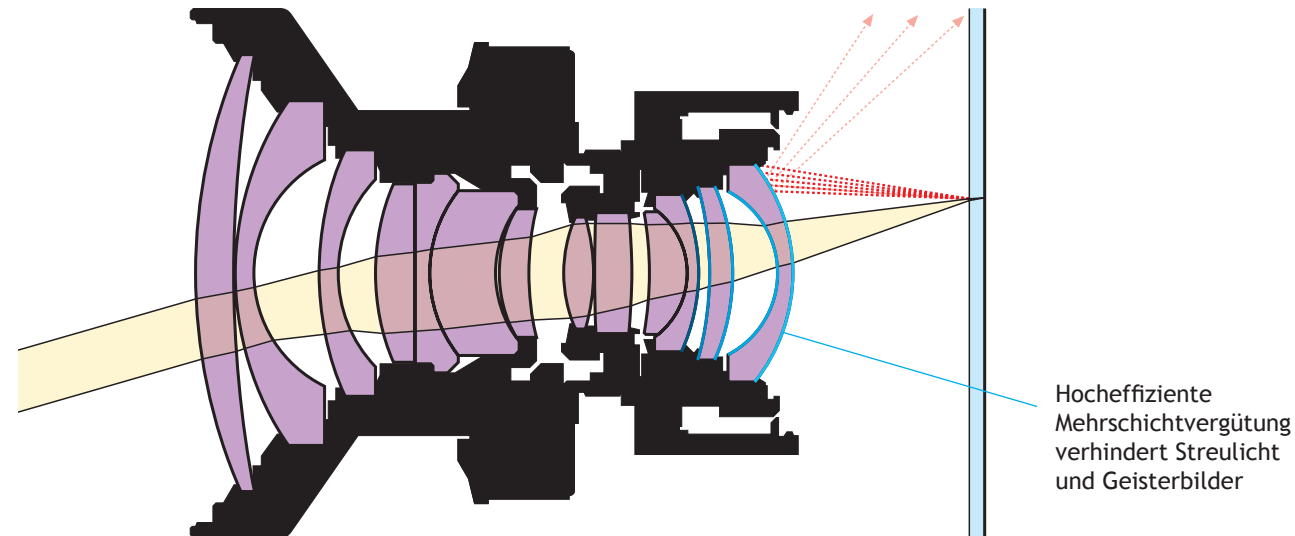
Weil das Schutz- und Filterglas vor dem Sensor spiegelt, kann das reflektierte Licht störendes Falschlicht erzeugen

Wirksamere MC-Vergütung ist nötig

Während die dem Objektiv zugewandte Schichtseite des Films matt und grau bis bräunlich ist, hat das Schutz- und Filterglas des Sensors eine perfekt glattpolierte und relativ stark spiegelnde Oberfläche. Das führt zu einer gerichteten (statt diffusen) Reflexion des vom Objektiv her einfallenden Lichts. Sie wird dort störend sichtbar, wo leuchtende oder glänzende Gegenstände abgebildet werden - z. B. an Lichtquellen in Nachtaufnahmen sowie an der Sonne und an Glanzlichtern auf Lack-, Metall- und Wasserflächen bei Tageslichtaufnahmen, vor allem dann, wenn diese hellen Stellen nahe der Bildmitte liegen.

Wenn das dort vom Schutz- und Filterglas zurück zum Objektiv gespiegelte Licht auf die Hinterlinse oder auf die nächsten dahinterliegenden Linsenflächen trifft, wird es zu einem kleinen Prozentsatz (bei Einschichtvergütung zu ca. 1,5% bis 2%, bei Mehrschichtvergütung zu ca. 0,5% bis 1%) erneut zum Sensor zurückgeworfen. Je nach Lage des hellen Bildpunktes und je nach Wölbung der hinteren Linsenflächen kann eine diffuse Aufhellung zu Kontrastminderung speziell in den Schattenpartien oder sogar (bei konkaven Linsenflächen) eine stärker gerichtete Reflexion zu sehr hässlichen Geisterbildern führen.

Beim HR Digaron-S und HR Digaron-W wird darum eine hocheffiziente Mehrschichtvergütung eingesetzt, um die Reflexionen auf ein unsichtbares Minimum zu reduzieren.



Von hellen Bildpunkten und -flächen wird Licht zur Hinterlinse und dort erneut zum Sensor reflektiert; nur eine hochwirksame MC-Vergütung kann Kontrasteinbußen und Geisterbilder verhindern

Sensoren mit Mikrolinsen vor der Pixelebene sind anfällig für Abschattung bei schräg einfallenden Randstrahlen

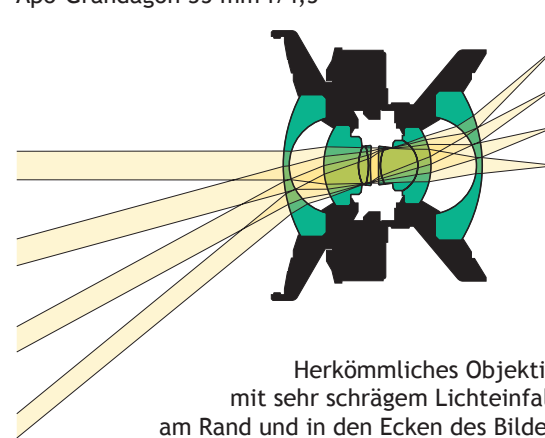
Randabschattung durch Mikrolinsen

Bei herkömmlichen Weitwinkelobjektiven für Fachkameras treten schräg einfallende Lichtstrahlen bildseitig ebenso schräg aus. Für den Film sind sehr schräge Randstrahlen harmlos. Die bei flacherem Lichteinfall auf den Film zunehmende Reflexion erhöht den von Cos^4 -Effekt und Vignettierung erzeugten Helligkeitsabfall nur minimal.

In der digitalen Fotografie bewirkt ein sehr schräger Lichteinfall auf den Sensor aber einen zusätzlichen Helligkeitsabfall, wenn die lichtempfindliche Pixeloberfläche vertieft zwischen Leiterbahn-Abdeckungen liegt oder Mikrolinsen zur Steigerung der Empfindlichkeit vorgeschaltet sind. Ohne Mikrolinsen werfen die Abdeckungen bei sehr schrägem Lichteinfall Schatten. Mit Mikrolinsen wird das verhindert, aber ab einem gewissen Winkel konzentrieren die Linsen den Lichtfleck nicht mehr vollständig auf die lichtempfindliche Pixelfläche.

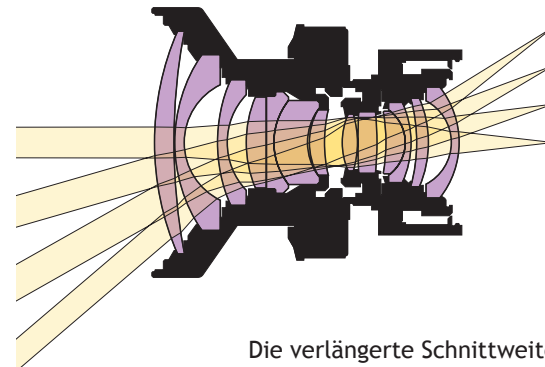
Bei den Weitwinkelobjektiven der Serien HR Digaron-S und HR Digaron-W wurde die Schnittweite (= Abstand der Hinterlinse vom Sensor) für einen steileren Lichteinfall auf den Sensor verlängert, um den zusätzlichen Helligkeitsabfall zu verhindern.

Apo-Grandagon 35 mm f/4,5

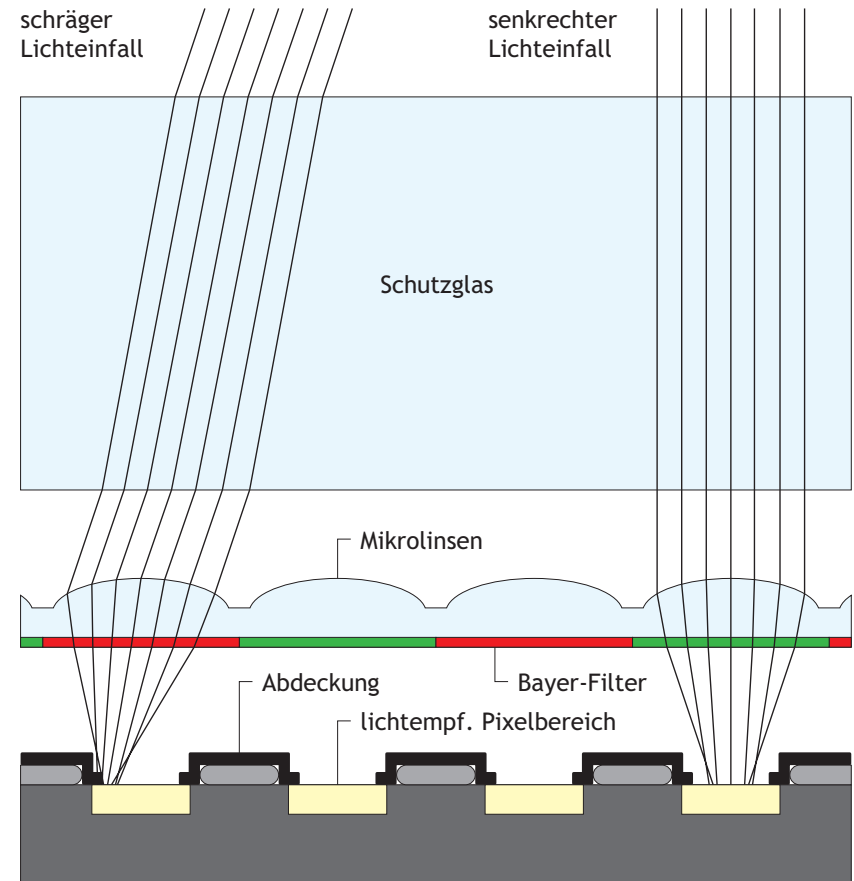


Herkömmliches Objektiv mit sehr schrägem Lichteinfall am Rand und in den Ecken des Bildes

HR Digaron-S 35 mm f/4



Die verlängerte Schnittweite führt zu einem steileren Lichteinfall



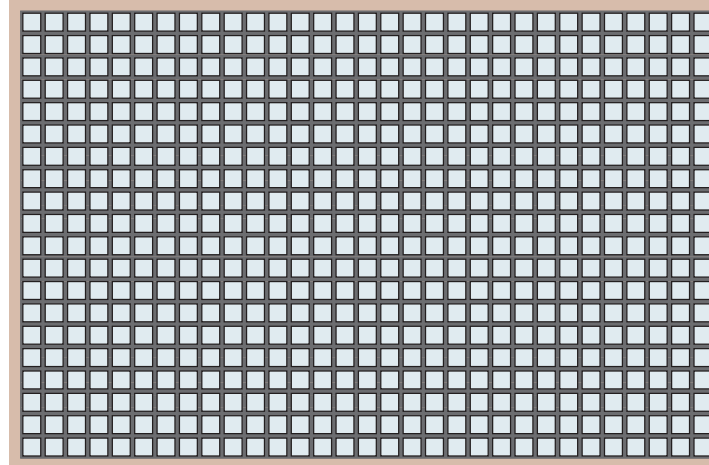
Bei zu schrägem Lichteinfall auf den Sensor können die Mikrolinsen das Licht nicht mehr innerhalb der lichtempfindlichen Pixelfläche bündeln, was einen zusätzlichen Helligkeitsabfall zum Rand verursacht

Retrofokus-Konstruktion ermöglicht einen steileren Lichteinfall ohne störenden Helligkeitsverlust; außerdem schafft die längere Schnittweite bei Weitwinkelobjektiven Freiraum für Schwenkungen

Die regelmäßige Pixel-Gitterstruktur des Sensors erzeugt Moiré und begrenzt die Auflösung auf die (halbe) Nyquist-Frequenz

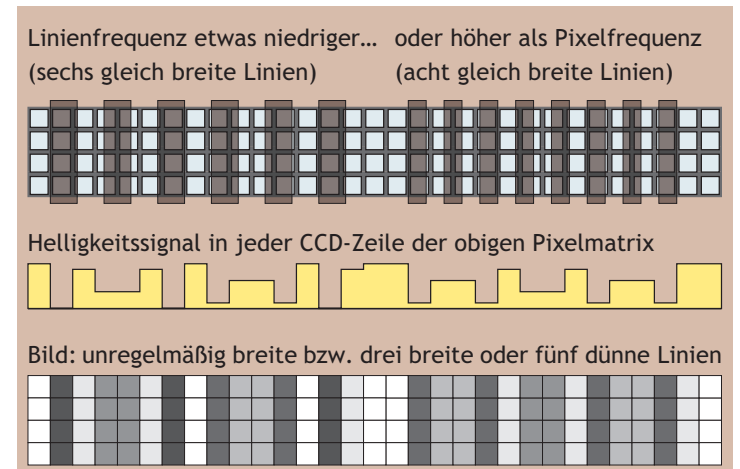
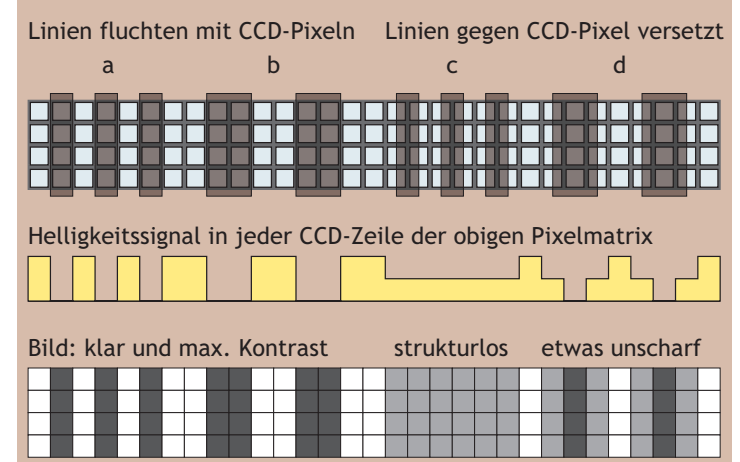
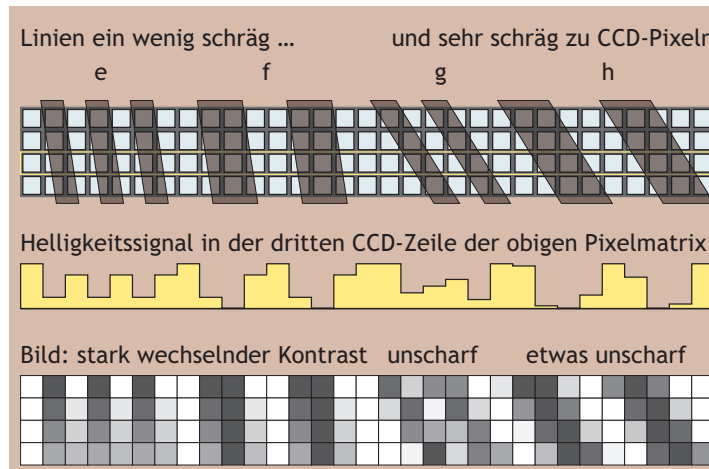
Moiré und andere störende Artefakte

Während die Kornstruktur des Films in der Korngröße und im Kornabstand stark variiert, weist der Sensor eine völlig regelmäßige Pixelstruktur auf. Das hat zur Folge, dass bei ebenfalls regelmäßigen Bildstrukturen ähnlicher Feinheit durch Überlagerung („Interferenz“) neue Strukturen entstehen, die als Artefakte (lat. für künstlich Erzeugtes) oder bei flächigem Auftreten in Form wellenförmiger Muster als Moiré bezeichnet werden. Die Zeichnungen rechts zeigen, wie diese Artefakte je nach Lage und Feinheit der Bildstruktur (dunkelbraune Balken) auf dem regelmäßigen Pixelgitter (hellgraue Quadrate) entstehen.



Die gelb unterlegte Signalform zeigt den Helligkeitsverlauf längs der Pixelzeile, die Fläche darunter des resultierende Bild.

Außerdem begrenzt die Feinheit der Pixelstruktur die Auflösung des Bildes. Theoretisch kann die Auflösung in Linienpaaren pro Millimeter maximal gleich der halben Anzahl der Pixel pro Milimeter (= Nyquist-Frequenz) betragen - wenn die Bildstruktur exakt auf der Pixelstruktur liegt (a, b). Ist die Bildstruktur um eine halbe Pixelrasterweite verschoben (c, d) verschwindet die Bildstruktur bei der Nyquistfrequenz (graue Fläche bei c) und wird erst wieder bei halber Nyquistfrequenz deutlich (d). Schräger Verlauf erzeugt außerdem mit dem Linienverlauf wechselnden Kontrast.



Bei der Nyquist-Frequenz (ein Linienpaar = zwei Pixelbreiten) das Bild ist scharf, wenn alle Linien auf Pixelreihen fallen (a), aber völlig strukturlos, wenn sie um eine halbe Reihe verschoben sind (c)

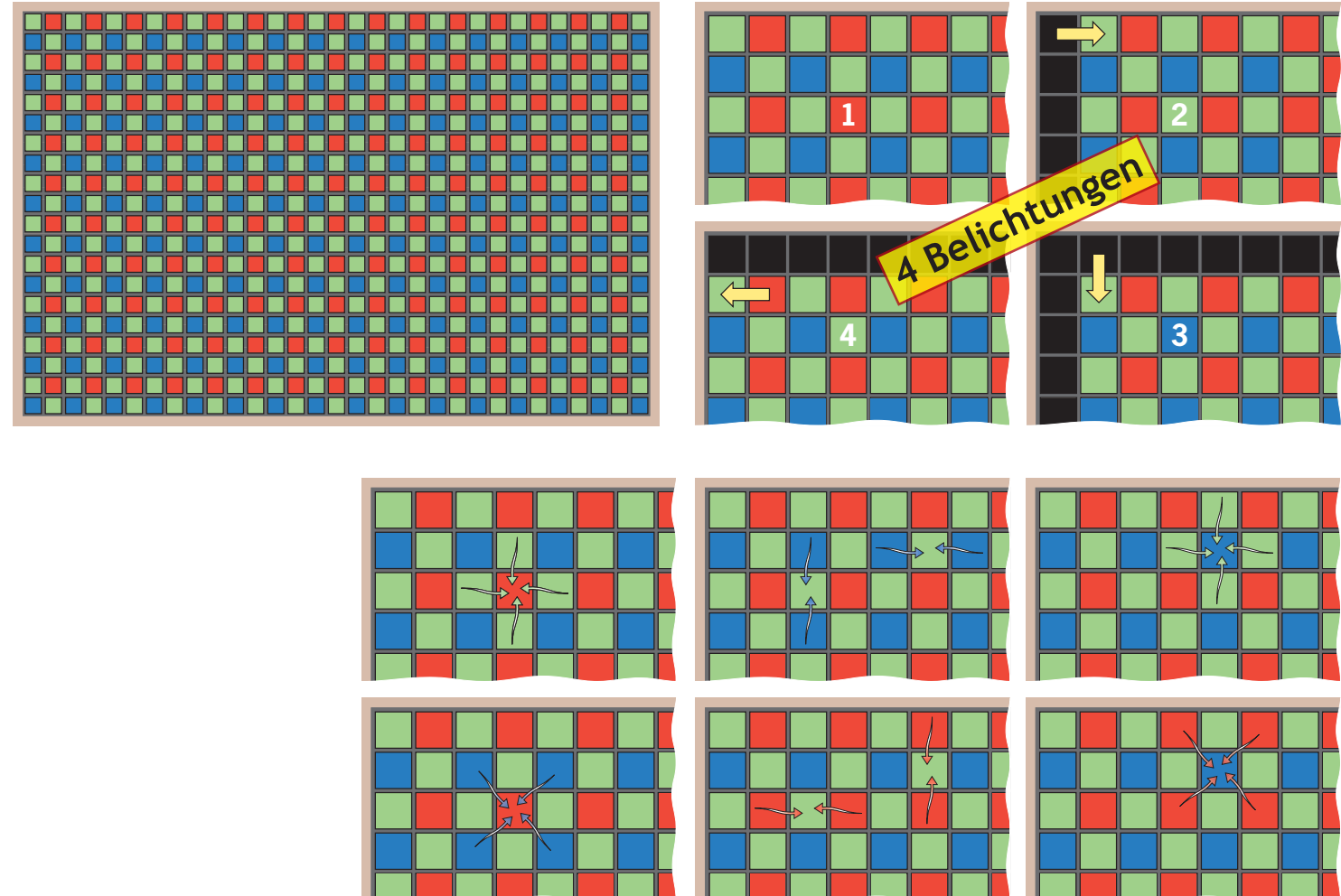
Sensoren mit Bayer-Filter erfordern Interpolation der Farbwerte oder müssen mehrfach mit „Pixel-Shift“ belichtet werden

Jedes Pixel erfordert drei Farbwerte

Farbaufnahmen mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB) erfordern für jeden Bildpunkt (Pixel) die Helligkeitswerte aller drei Farben. Sensoren mit dem schachbrettartigen Bayer-Filter erfassen aber an jedem Pixel zeilenweise abwechselnd nur eine der drei Grundfarben Rot, Grün, Rot, Grün, ... und Grün, Blau, Grün, Blau, ...

Mit vier aufeinanderfolgenden Aufnahmen, zwischen denen der Sensor um eine Pixel-rasterweite horizontal oder vertikal verschoben wird (gelbe Pfeile im Bild rechts oben), können nacheinander alle Farbwerte für jedes Pixel erfasst werden. Doch so sind keine Aufnahmen von Motiven mit Bewegung möglich. Macht man aber nur eine Aufnahme, so müssen die beiden an jedem Pixel fehlenden Farbwerte aus denen der benachbarten Pixel „interpoliert“ werden.

An roten Pixeln (erstes Bild) können Grün- (oben) und Blauwerte (unten) aus vier benachbarten Grün- bzw. Blaupixeln gemittelt werden. An grünen Pixeln (zweites Bild) gibt es nur zwei benachbarte Blau- (oben) bzw. Rotpixel (unten). An blauen Pixeln (drittes Bild) sind wiederum vier direkt benachbarte Grün- (oben) und Rotpixel (unten) zur Interpolation verfügbar. Leider reduziert Interpolation die Schärfe, und die regelmäßige Rasterstruktur jeder einzelnen Farbe verursacht störendes Farbmoiré.



Sensoren mit Bayer-Filter ermöglichen Kurzzeit- und Blitzaufnahmen auch von bewegten Motiven, aber die dann nötige Interpolation führt zu geringerer Schärfe und Farbrauschen (durch Farbmoiré)

An Hell-dunkel-Kanten entstehen beim Bayer-Filter Farbsäume und verursachen mit Moiré-Effekten ein Interpolations-Farbrauschen

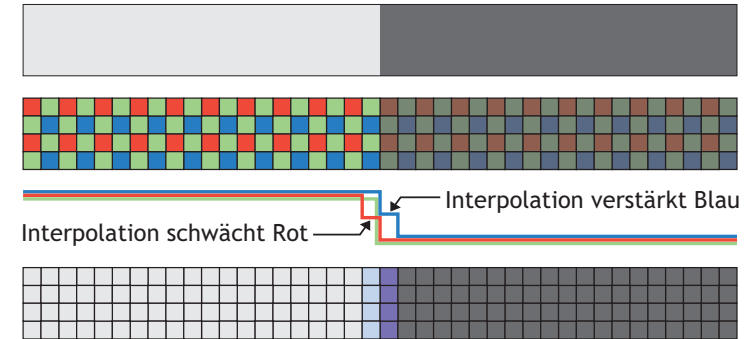
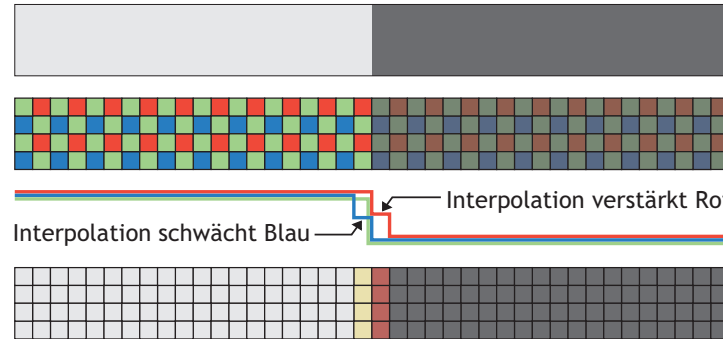
Farbinterpolation erzeugt Farbsäume

An der Grenze zwischen hellen und dunklen Flächen verursacht die Interpolation in den direkt benachbarten Pixelreihen oder -zeilen einen Farbsaum. Je nachdem, ob auf der hellen Seite der Kante rote (linkes Bild) oder blaue Pixel (rechtes Bild) liegen, ist der Farbsaum orange oder blauviolett. Die doppelt so zahlreichen Grünpixel kommen in jeder Reihe und Zeile vor und verursachen keine Interpolations-Farbsäume.

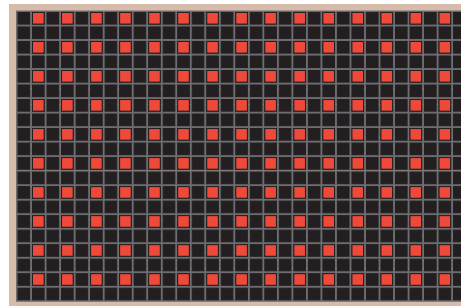
Weil derselbe Effekt nicht nur an kontrastreichen Kanten zwischen Flächen, sondern auch von linien- und punktförmigen Strukturen auftritt, diese Farbsäume aber meist feingliedrig und unregelmäßig verteilt sind, wirken sie ähnlich wie Farbrauschen.

Während das thermische Farbrauschen vor allem in homogenen Flächen störend sichtbar wird, zeigt sich Interpolations-Farbrauschen nur in feinstrukturierten Flächen.

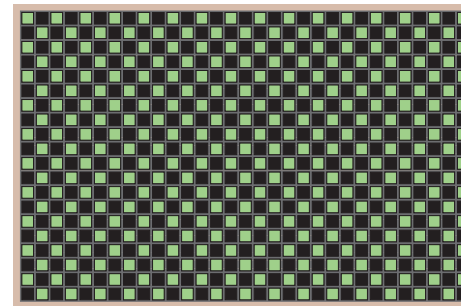
Auch das innerhalb jeder RGB-Farbe wegen der regelmäßigen Pixelstruktur auftretende rote, grüne und blaue Moiré verstärkt in feinstrukturierten Flächen das Farbrauschen, wenn die Bildstrukturen regelmäßig sind. Denn die Moiré-Muster sind in jeder RGB-Farbe etwas anders, weshalb sie sich bei der Überlagerung nicht farblich neutralisieren, sondern eine bunt gesprenkelte Struktur auf dem Moiré-Muster liefern.



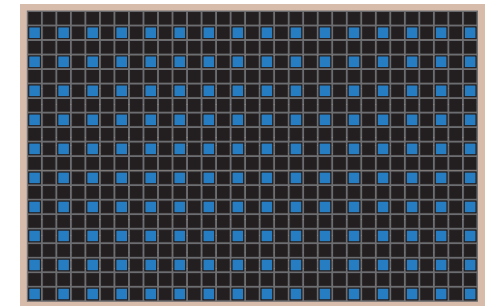
In jedem der drei Farbauszüge entsteht wegen der regelmäßigen Pixelstruktur Moiré, aber jedesmal sieht dieses Moiré etwas anders aus.



Im roten Farbauszug entsteht Moiré bevorzugt bei vertikalen und horizontalen Linienstrukturen, weil die Rotpixel in senkrechten und waagerechten Reihen mit doppeltem Pixelabstand angeordnet sind. Deshalb entspricht die Nyquistfrequenz der Rasterweite von vier Pixeln (aller Farben).



Im grünen Farbauszug entsteht Moiré bevorzugt bei 45° schrägen Linienstrukturen, weil die Grünpixel in schrägen Reihen mit ca. 1,4facher Pixelfrequenz angeordnet sind. Die Nyquistfrequenz entspricht etwa der 2,8fachen Pixelrasterweite. Der Moiréeffekt an den vertikalen und horizontalen Pixelreihen ist hier schwächer ausgeprägt.



Im blauen Farbauszug ist die Pixelanordnung wie im roten Farbauszug und daher entsteht Moiré bei gleich feinen Bildmustern. Aber weil die blauen Pixel um je eine Pixelrasterweite in der Höhe und seitlich gegenüber den roten Pixeln versetzt sind, fällt das Moiré-Muster anders aus.

Da Rot- und Blau-Pixel nur in jeder zweiten Spalte bzw. Zeile vorkommen, entstehen an Kanten Farbsäume, und die im Rot- und Blauauszug andere Nyquistfrequenz als im Grünauszug verbindet Moiré mit Farbrauschen

Die neuen 80-Megapixel-Digitalrückteile haben 5,2 µm große Pixel, aber bei Blende 4 ist das Beugungsscheibchen bereits 5,4 µm groß!

Sensorauflösung = Objektivauflösung?

Die derzeit am höchsten auflösenden Digitalrückteile bieten 80 Megapixel bei einem Sensorformat von 40,4 mm x 53,7 mm. Das ergibt eine Pixelrasterweite von 5,2 µm bzw. im digitalen Bild, wo (im Gegensatz zum Sensor) die Pixelquadrate ohne Zwischenraum aneinandergrenzen, eine Pixelkantenlänge von 5,2 µm.

Leider können selbst die besten Objektive aber nie eine höhere Auflösung liefern, als die physikalische Beugungsgrenze vorgibt. Der Durchmesser des Beugungsscheibchens in µm beträgt $d = 1,34 \cdot \text{Blendenzahl}$. Ein ideales, völlig aberrationsfreies Objektiv hätte also bei Blende 4 bereits einen Beugungsscheibchen-Durchmesser von 5,4 µm. Wenn für größere Schärfentiefe abgebildet wird, ergeben sich folgende Werte:

Blende 4	Beugungsscheibchen	5,4 µm
Blende 5,6	Beugungsscheibchen	7,6 µm
Blende 8	Beugungsscheibchen	10,7 µm
Blende 11	Beugungsscheibchen	15,1 µm

Das legt auf den ersten Blick den Schluss nahe, dass die neuen Digitalrückteile eine höhere Auflösung bieten würden als die besten Objektive – oder umgekehrt formuliert: dass selbst die besten Objektive für diese extrem hohe Auflösung der neuesten Digitalrückteile nicht gut genug wären.

Es stellt sich dann noch als zweite Frage, ob die Sensorhersteller mit einer Auflösung von 80 Megapixel und 5,2 µm großen Pixeln nicht schon den Bogen überspannt haben und dem Fotografen einen Qualitätsgewinn versprechen, der gar nicht möglich ist.

Um diese Fragen zu klären, müssen wir uns überlegen, ob das Beugungsscheibchen als Maß für die Grenzauflösung des Objektivs und die Pixelrasterweite (bzw. Pixelgröße) als das übliche Maß für die Sensorauflösung überhaupt vergleichbare Werte darstellen.

Inzwischen liegen genügend Bilderergebnisse vor, die z.B. mit den extrem hochauflösenden Objektiven der Serie HR Digaron-W in Kombination mit den neuen 80-Megapixel-Digitalrückteilen entstanden sind. Erstaunlicherweise zeigen sie eine deutlich sichtbare Qualitätssteigerung, sogar noch bei Blende 8 mit doppelt so großem Beugungsscheibchen-Durchmesser wie bei Blende 4. Also muss die Sensorauflösung bei 5,2 µm großen Pixeln die Bildqualität noch immer stärker beeinträchtigen als 5,4 µm große Beugungsscheibchen! Wie ist das möglich?

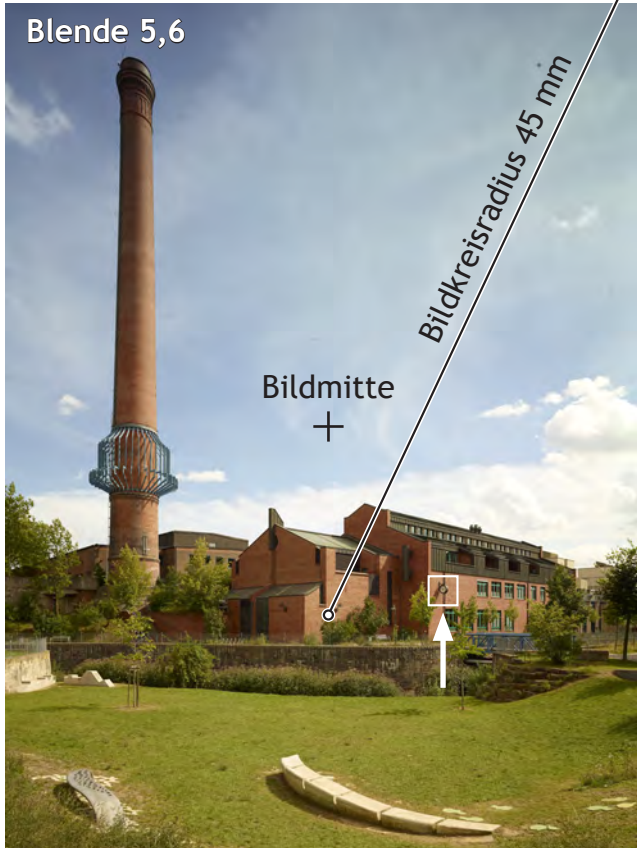


Ist dieses Digitalobjektiv gut genug für ein modernes Digitalrückteil mit 80 Megapixel und 5,2 µm Pixelrasterweite?

Sie werden auf den folgenden Seiten eine mit überzeugenden Vergleichsbildern gut begründete Antwort darauf finden.

Wenn Beugungsscheibchen-Durchmesser und Pixelrasterweite gleich groß sind, wird die Bildschärfe weitgehend von der Pixelrasterstruktur bestimmt; ihr Einfluß dominiert um mehr als den Faktor 4

Das HR Digaron-W 32 mm f/4 liefert am hochauflösenden Sensor 40 mm x 54 mm beugungsbegrenzte Schärfe im Zentrum ab Blende 4, am Rand ab Blende 5,6



Bei starker Abblendung reduziert Beugung die Schärfe



Bei zunehmender Abblendung wird die Schärfe nicht mehr besser, sondern nimmt über Blende 8 hinaus aufgrund der physikalisch unvermeidbaren Beugung schon erkennbar ab. Das beweist die exzellente Bildqualität des HR Digaron-W.

Im zentralen Bereich des Bildkreises liefert bereits Blende 4 die beste Schärfe und den höchsten Kontrast; weiter abgeblendet werden sollte nur, wenn es die Schärfentiefe erfordert (möglichst nicht über Blende 8)

Am Bildkreisrand wird bereits bei Blende 5,6 beste Schärfe erzielt;
der Helligkeitsabfall (speziell bei Blende 4) verschwindet mit Centerfilter



Wie die Ausschnittvergrößerungen zeigen, wird nahe dem Bildkreisrand schon ab Blende 5,6 hervorragende Schärfe erzielt; Blende 8 bringt so gut wie keine Steigerung mehr. Besser als mit dem HR Digaron-W 32 mm f/4 geht es nicht.

Je nach Parallelverschiebung bis nahe zum Bildkreisrand empfiehlt sich Blende 5,6 bis maximal 8;
auch hier ist weiteres Abblenden unnötig und würde nur Schärfe und Kontrast durch Beugung reduzieren

Dass die Beugungsunschärfe kleiner als die Pixelrasterweite sein müsse, ist ein weitverbreiteter Irrtum – hier wird er überzeugend widerlegt

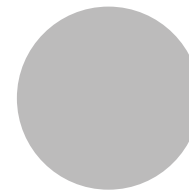
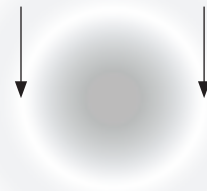
Beugungsscheibchen- und Pixelgröße

Sogar erfahrene Fotografen nehmen oft an, dass Beugungsscheibchen und Pixelquadrate bei gleicher Größe gleiche Wirkung auf die Schärfe haben. Doch das ist falsch, weil ...

1. das Beugungsscheibchen an jedem Ort liegen kann (also keine treppenförmigen Kanten bildet), ein Pixelquadrat aber nur an den vom Raster vorgegebenen Stellen,
2. das Beugungsscheibchen in der Mitte am hellsten ist und zum Rand hin allmählich dunkler wird (der Durchmesser also kleiner wahrgenommen wird) und die umgebenden Ringe meistens so gut wie unsichtbar sind.

Die folgenden Bilder zeigen, dass die quadratischen Pixel einen wesentlich höheren negativen Einfluss auf die Bildschärfe haben als gleich große Beugungsscheibchen:

- Die Pixelquadrate bilden gegeneinander scharf abgegrenzte und in sich homogene Kacheln und an schrägen Kanten Stufen. Es gibt keine glatten Verläufe an Kanten oder in Flächen wechselnder Helligkeit.
- Die Pixelquadrate bilden ein periodisches Muster, das zu Moiré und Artefakten führt.
- Die Pixelquadrate können keine „Punkte“ zwischen den Pixelzeilen und -spalten des Rasters darstellen; ein Punkt dazwischen färbt zwei bis vier Pixel ein, deren Helligkeitsverhältnis von der Punktlage abhängt. Bildpunkte werden bis zu vier Pixel groß.



Als **Beugungsscheibchen**-Durchmesser gilt der Durchmesser des Nullstellenrings zwischen dem zentralen Scheibchen und dem ersten Ring (Rayleigh-Kriterium). Das zentrale Scheibchen wirkt kleiner, weil seine Intensität zum Rand hin abfällt. Das Zentrum des Beugungsscheibchens liegt genau dort, wo die Punktabbildung sein sollte.

Das **Unschärfescheibchen** als Folge ungenauer Entfernungseinstellung ist dagegen scharf begrenzt, von homogener Intensität und wirkt bei gleichem Durchmesser merklich größer als ein Beugungsscheibchen. Sein Zentrum liegt ebenfalls dort, wo die scharfe Punktabbildung sein sollte, ist also auch an keine Rasterstruktur gebunden.

Ein **quadratisches Pixel** mit der Kantenlänge des Beugungsscheibchen-Durchmessers ist ebenfalls scharf begrenzt, von homogener Intensität und wirkt noch größer als ein Unschärfescheibchen. Es ist an die feste Pixelrasterstruktur gebunden, kann also nicht irgendwo dazwischen liegen und reduziert dadurch die Schärfe drastisch.



Scharfe Originalstruktur ohne Pixel und Beugung



Resultierende Bildstruktur aus Beugungsscheibchen 6 µm ohne Pixelraster



Resultierende Bildstruktur aus Pixelrasterweite 6 µm ohne Beugung



Resultierende Bildstruktur aus Pixelrasterweite 6 µm und Beugungsscheibchen 6 µm

↑ kaum ein Unterschied ↑

Wenn Beugungsscheibchen-Durchmesser und Pixelrasterweite gleich groß sind, wird die Bildschärfe weitgehend von der Pixelrasterstruktur bestimmt; ihr Einfluss dominiert um mehr als den Faktor 4

Auch bei „normalen“ Motiven statt Siemensstern-Testtafeln hat Beugung weit weniger Einfluss auf die Bildschärfe als die Pixelrasterweite

Pixelgrößensimulation durch Binning

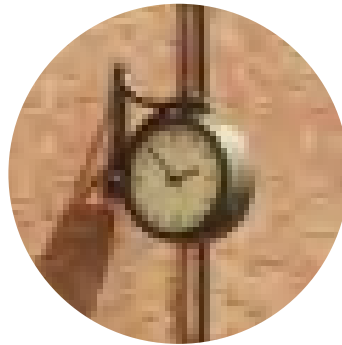
Wenn unsere Überlegungen zur Beugungs- und Pixelgröße stimmen, heißt das, dass unsere höchstauflösenden Digitalrückteile die Schärfeleistung der besten Objektive noch nicht darstellen können. Also könnten diese Objektive mit höherer Sensorauflösung noch schärfere Aufnahmen liefern!

Wir wollen das anhand der Ihnen schon bekannten Uhr prüfen. Die Ausschnittvergrößerung rechts außen stammt aus der Aufnahme mit dem HR Digaron-W 32 mm f/4 bei Blende 16. Bei dieser kleinen Blende ist das Beugungsscheibchen nach dem Rayleigh-Kriterium 21,7 µm groß, also fast viermal so groß wie die Pixelrasterweite des verwendeten 60-Megapixel-Sensors.

Man sollte meinen, dass bei so großer Beugungsunschärfe auch ein Sensor von weit geringerer Auflösung für annähernd gleiche Schärfe ausgereicht hätte. Ist das wahr?

Wir können das leicht überprüfen, indem wir durch Binning mit Photoshop die Pixelrasterweite verdoppeln (mittleres Bild) und vervierfachen (linkes Bild):

Ist die Pixelgröße etwa gleich der Beugung (linkes Bild), wird die Schärfe hauptsächlich von der Pixelgröße bestimmt. Sind die Pixel halb so groß, erzielen wir noch immer nicht die beste Schärfe. Erst wenn die Pixelgröße einem Viertel entspricht, haben wir das optimale Verhältnis zur Beugung.



Pixelrasterweite
≈
Beugungsscheibchen-Durchmesser
Beugungsscheibchen-Ø = 21,7 µm
und
Pixelrasterweite = 24 µm

Durch Binning ließ sich hier die Pixelrasterweite des Sensors an die Größe der Beugung anpassen, ...



Pixelrasterweite
≈
1/2 Beugungsscheibchen-Durchmesser
Beugungsscheibchen-Ø = 21,7 µm
und
Pixelrasterweite = 12 µm

... aber sogar bei nur halber Größe wird die Schärfeleistung des Objektivs noch nicht im Bild sichtbar.



Pixelrasterweite
≈
1/4 Beugungsscheibchen-Durchmesser
Beugungsscheibchen-Ø = 21,7 µm
und
Pixelrasterweite = 6 µm

Erst eine Pixelrasterweite von etwa 1/4 des Beugungsscheibchen-Durchmessers (16fache Pixelanzahl!) reicht aus.

Die Pixelrasterweite beeinträchtigt die Schärfe mehr als Beugung mit gleicher Scheibchengröße. Eine optimale Abstimmung beider Größen für bestmögliche Schärfe ergibt sich, wenn die Pixelrasterweite etwa ein Viertel des Beugungsscheibchen-Durchmessers beträgt.

Bei Blende 5,6 ist das Beugungsscheibchen aber nur 7,6 µm groß, was dann für knapp unter 2 µm Pixelrasterweite ausreicht.

Die beugungsbegrenzte Auflösung der Rodenstock-Digitalobjektive mit 5,4 µm großem Beugungsscheibchen bei Blende 4 (10,7 µm bei Blende 8) reicht sogar noch für künftige Pixelrasterweiten bis zur Größenordnung von ca. 2 µm

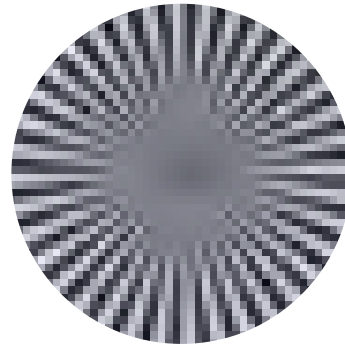
Aufnahmen eines Siemenssterns zeigen auch noch zunehmende Schärfe, wenn die Pixelrasterweite wesentlich kleiner als die Beugung wird

Die Pixelgröße begrenzt die Schärfe

Die Vergleiche auf der vorigen Seite haben anschaulich gezeigt, dass die Pixelstruktur einen wesentlich größeren Einfluss auf die resultierende Bildschärfe hat als die Größe des Beugungsscheibchens. Jetzt werden wir versuchen, das Verhältnis dieser beiden Einflüsse quantitativ genauer zu ermitteln.

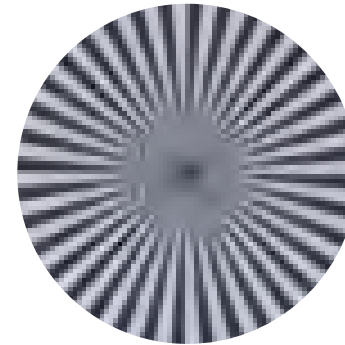
Siemenssterne eignen sich wegen ihrer zur Mitte hin immer feineren Struktur (= höher werdender Ortsfrequenz) besonders gut als Testmotive. Alle drei hier stark vergrößerten Siemensstern-Aufnahmen wurden mit einem hochauflösenden Objektiv gemacht, das auf Blende 5,6 abgeblendet war und daher ein Beugungsscheibchen von 7,6 µm Durchmesser lieferte. Nach herkömmlicher Meinung sollte die erste Aufnahme, bei der die Pixelrasterweite ebenfalls 7,6 µm war, bereits das bestmögliche Ergebnis liefern, weil die Beugungsscheibchen und die Pixelrasterweite exakt gleich groß sind.

Doch die zweite Aufnahme mit identischer Beugung und nur halb so großer Pixelrasterweite sieht deutlich schärfer aus, und die dritte Aufnahme mit nochmals halbiertes Pixelrasterweite zeigt unbestreitbar eine weitere Steigerung der Schärfe. Erst wenn man noch ein weiteres Mal die Pixelrasterweite halbiert, ist keine nennenswerte Schärfesteigerung mehr wahrnehmbar. Das optimale Verhältnis von Beugungsscheibchengröße zu Pixelrasterweite ist also 4:1.



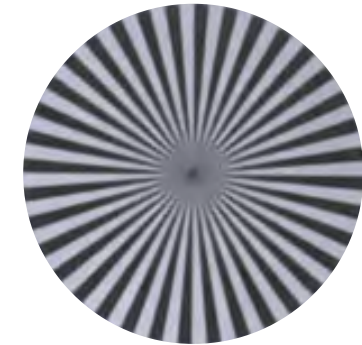
Pixelrasterweite
=
Beugungsscheibchen-Durchmesser
Beugungsscheibchen-Ø = 7,6 µm
und
Pixelrasterweite = 7,6 µm

Wenn dieses Bild ein Ausschnitt aus einer Digitalaufnahme mit 37 mm x 49 mm großem Sensor von **30 Megapixel** Auflösung wäre, ...



Pixelrasterweite
=
1/2 Beugungsscheibchen-Durchmesser
Beugungsscheibchen-Ø = 7,6 µm
und
Pixelrasterweite = 3,8 µm

... dann entspräche dieses Bild einer Aufnahme mit demselben Objektiv, gleicher Blende und gleich großem Sensor mit **120 Megapixel** Auflösung ...



Pixelrasterweite
=
1/4 Beugungsscheibchen-Durchmesser
Beugungsscheibchen-Ø = 7,6 µm
und
Pixelrasterweite = 1,9 µm

... und dieses noch schärfere Bild einer Aufnahme mit demselben Objektiv, gleicher Blende und gleich großem Sensor mit **480 Megapixel** Auflösung.

Wenn man **Blende 8** als Standard zugrundelegt, weil oft mehr Schärfentiefe nötig ist, halbiert sich die maximale Pixelzahl; die heutige Objektivauflösung reicht dann bis **240 Megapixel** aus.

Wenn die Pixelrasterweite gleich dem Beugungsscheibchen-Durchmesser ist, wird die Schärfeleistung des Objektivs längst nicht ausgeschöpft; sie nimmt bei Blende 8 bis zur 8fachen und bei Blende 5,6 bis zur 16fachen Pixelzahl sichtbar zu

Die Digitalobjektiv-Serien HR Digaron-S und HR Digaron-W erfüllen höchste Ansprüche, auch bei noch weiter gesteigerter Sensorauflösung

Sichere Investition für die Zukunft

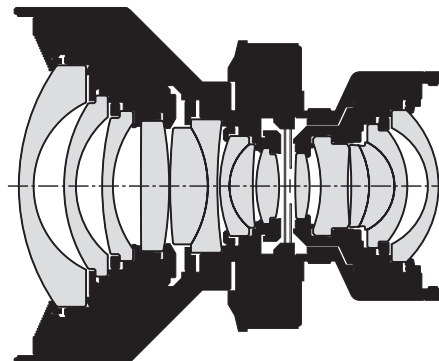
Die weitverbreitete Ansicht, nach der sich beste Bildqualität ergäbe, wenn die Pixelrasterweite so groß wie der Durchmesser des Beugungsscheibchens ist, hat sich als falsch erwiesen. Die derzeit höchstauflösenden Digitalrückteile mit 80-Megapixel-Sensoren und 5,2 µm Pixelrasterweite sind zwar ein zu begrüßender Fortschritt, aber noch nicht gut genug, um unsere besten Digitalobjektive der Serien HR Digaron-S und HR Digaron-W mit noch höherer Auflösung an ihre Leistungsgrenze zu bringen.

Das HR Digaron-S und das HR Digaron-W in allen verfügbaren Brennweiten liefern ihre optimale Schärfe innerhalb eines weiten zentralen Bildkreisbereichs schon zwischen voller Öffnung und Abblendung um eine Stufe. Wenn das Bildfeld bis an den Rand des Bildkreises reicht, ist noch eine Stufe weiter abzublenden. Die Schärfe ist dann beugungsbegrenzt – besser geht es nicht.

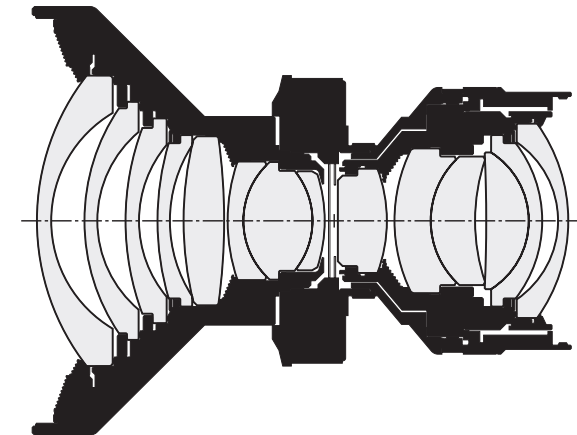
Das Beugungsscheibchen ist bei Blende 5,6 ca. 7,6 µm und bei Blende 8 ca. 10,7 µm groß. Diese Objektive kommen daher erst dann an ihre Leistungsgrenze, wenn die Pixelrasterweite ein Viertel des Beugungsscheibchen-Durchmessers beträgt, also bei Blende 5,6 nur ca. 1,9 µm und bei Blende 8 ca. 2,7 µm. Das entspricht beim Sensorformat 40 mm x 54 mm einer Auflösung von knapp 600 bzw. knapp 300 Megapixel und eine sichere Investition in die Zukunft.



HR Digaron-S 23 mm f/5,6



HR Digaron-W 40 mm f/4



Beide Objektivserien eignen sich für Sensorformate bis 40 mm x 54 mm mit für heutige Verhältnisse gigantischer Sensorauflösung; das HR Digaron-S bietet große Verstellwege bis zum Format 33 mm x 44 mm, das HR Digaron-W bis zum Format 40 mm x 54 mm

HR Digaron-S ist optimiert für die Sensorformate bis 33 mm x 44 mm und HR Digaron-W mit größerem Bildkreis für noch größere Sensorformate

Viele Brennweiten für alle Formate

Die zwei Rodenstock-Digitalobjektiv-Serien HR Digaron-S und HR Digaron-W bzw. -SW decken alle im professionellen Bereich üblichen Sensorformate ab.

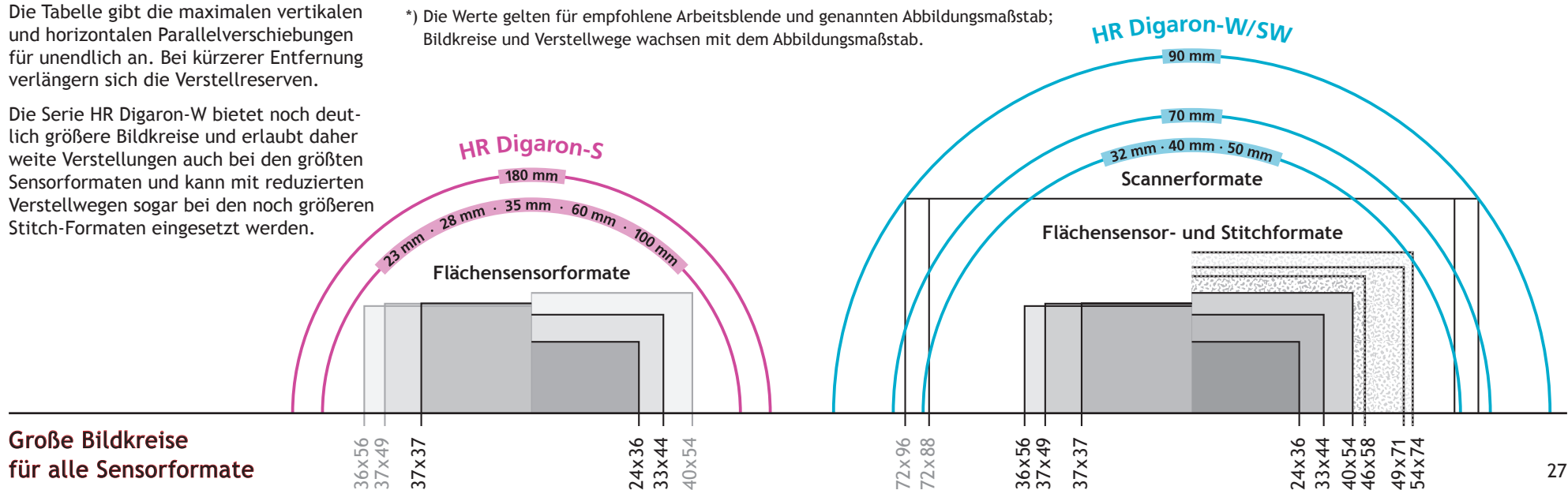
Die Serie HR Digaron-S für die wegen günstiger Kosten und dennoch schon sehr hoher Bildqualität verbreitetsten Kleinbild- und die etwas größeren Sensorformate bis 33 mm x 44 mm umfasst sechs Objektive in praxisgerecht abgestuften Brennweiten von 23 mm bis 180 mm und bietet ausreichend große Bildkreise für Kameraverstellungen. Wenn die Verstellwege nicht groß sein müssen, können diese Objektive auch für größere Sensoren benutzt werden.

Die Tabelle gibt die maximalen vertikalen und horizontalen Parallelverschiebungen für unendlich an. Bei kürzerer Entfernung verlängern sich die Verstellreserven.

Die Serie HR Digaron-W bietet noch deutlich größere Bildkreise und erlaubt daher weite Verstellungen auch bei den größten Sensorformaten und kann mit reduzierten Verstellwegen sogar bei den noch größeren Stitch-Formaten eingesetzt werden.

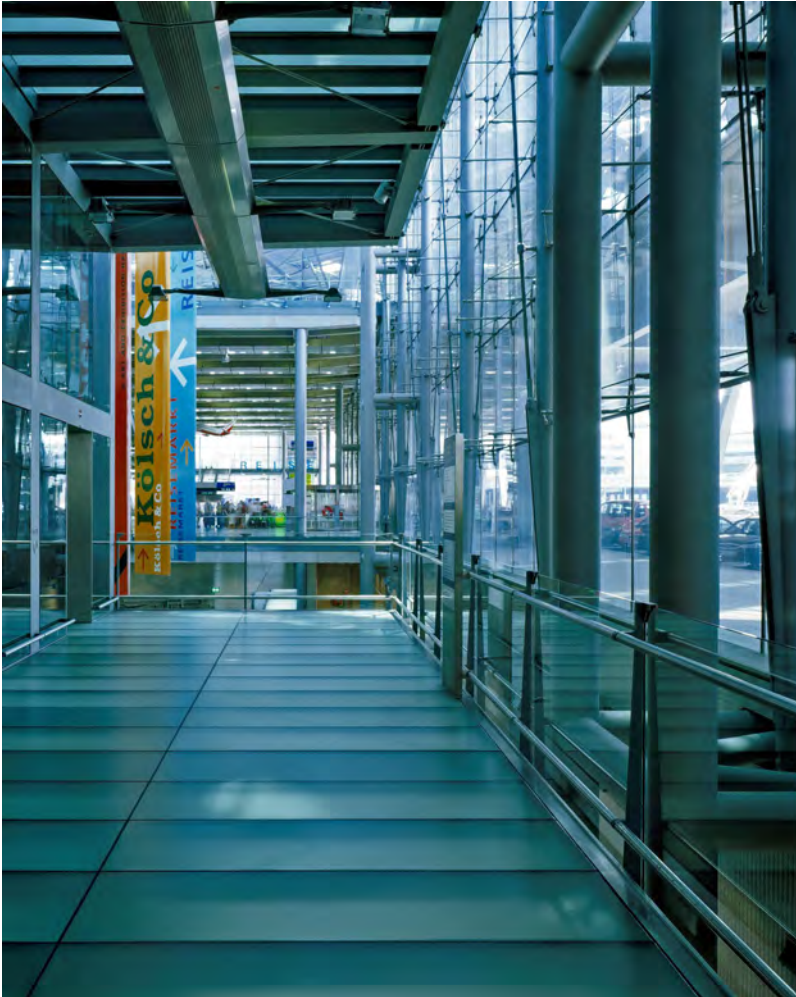
Objektiv	Brennweite und Öffnung	Bezugs-Abb.-Maßst.	Empf. Arbeitsblende	Bildwinkel	Bildkreis-Durchmesser	Verstellwege [mm] *) vertikal/horizontal (im Querformat)					
						24x36 mm	37x37 mm	33x44 mm	37x49 mm	36x56 mm	40x54 mm
HR Digaron-S	23 mm f/5,6	1:∞	5,6-8	112°	70 mm	18 / 15	11 / 11	11 / 9	7 / 5	3 / 2	2 / 2
	28 mm f/4,5	1:∞	5,6-8	101°	70 mm	18 / 15	11 / 11	11 / 9	7 / 5	3 / 2	2 / 2
	35 mm f/4	1:∞	5,6	90°	70 mm	18 / 15	11 / 11	11 / 9	7 / 5	3 / 2	2 / 2
	60 mm f/4	1:∞	5,6	60°	70 mm	18 / 15	11 / 11	11 / 9	7 / 5	3 / 2	2 / 2
	100 mm f/4	1:∞	5,6	39°	70 mm	18 / 15	11 / 11	11 / 9	7 / 5	3 / 2	2 / 2
	180 mm f/5,6	1:∞	5,6-8	25°	80 mm	24 / 20	17 / 17	17 / 14	13 / 11	11 / 8	9 / 8
HR Digaron-W	32 mm f/4	1:∞	5,6-8	107°	90 mm	29 / 25	23 / 23	23 / 20	19 / 17	17 / 13	16 / 13
	40 mm f/4	1:∞	5,6-8	94°	90 mm	29 / 25	23 / 23	23 / 20	19 / 17	17 / 13	16 / 13
	50 mm f/4	1:∞	5,6-8	82°	90 mm	29 / 25	23 / 23	23 / 20	19 / 17	17 / 13	16 / 13
	70 mm f/5,6	1:∞	5,6-8	70°	100 mm	35 / 31	28 / 28	28 / 25	25 / 22	23 / 19	22 / 19
HR Digaron-SW	90 mm f/5,6	1:∞	5,6-11	67°	120 mm	45 / 40	38 / 38	39 / 35	36 / 32	35 / 29	33 / 29

*) Die Werte gelten für empfohlene Arbeitsblende und genannten Abbildungsmaßstab; Bildkreise und Verstellwege wachsen mit dem Abbildungsmaßstab.



Große Bildkreise für alle Sensorformate

Mit den Objektivserien HR Digaron-S und HR Digaron-W hat der Fotograf ein Abonnement auf beste Schärfe



Fotos: Axel Hausberg

Überzeugender Detailreichtum und räumliche Tiefe zeichnen diese Weitwinkelaufnahmen aus; Verzeichnungs- und Farbsaumfreiheit sowie Kontrastbewältigung ohne Überstrahlung sind bemerkenswert

Bis unter die Beugungsgrenze gesenkte Aberrationen
garantieren Fotos von überwältigender Brillanz

R RODENSTOCK

www.rodenstock-foto.de



Foto: Helmut Hirler

Schwarzweißfotos erregen im bunten Alltag Aufmerksamkeit und erleben wieder eine Renaissance;
der Verzicht auf Farbe verlangt perfekte Komposition und gestochene Schärfe bis zum Rand

Perfekte Abbildung bis zum Rand extrem großer Bildwinkel ermöglichen atemberaubende Architekturaufnahmen



Fotos: Rien van Rijthoven

Überdimensionierte Bildkreise erlauben weite Verstellungen zur Beseitigung „stürzender Linien“ und ermöglichen so korrekt wirkende Perspektive mit bester Schärfe bis zu den Ecken

Ende

Für weitergehende Informationen
besuchen Sie bitte unsere Website

www.rodenstock-foto.de

oder schicken Sie eine eMail an

photo@qioptiq.de



Text, Layout und Zeichnungen: © Walter E. Schön