

Bevor man sich den Text antut, möchte man wissen, wohin er führt.
Hier einige aufschlussreiche Links zu Text und Bildern:

https://www.makro-forum.de/search.php?author_id=3667&fid%5B%5D=162&search_id=author_attachments&sr=topics&sf=firstpost&sk=t&sd=d&st=0&ch=300&sa=1

<https://www.focusstackingforum.de/g42-Kurt.html>

www.fotointern.ch/archiv/2017/11/05/fokus-stacking-ein-blick-in-die-makro-und-mikrowelt/
www.fotointern.ch/archiv/2017/12/03/die-reise-auf-dem-schmetterlingsfluegel/
www.fotointern.ch/archiv/2018/01/07/skutellum-oder-variationen-in-farbe-und-form/
www.fotointern.ch/archiv/2018/03/11/faszinierende-details-der-pflanzenwelt/

Dokument in Arbeit
Focus_Stacking_PDF.pdf

Focus Stacking



Kurt Wirz
(Guppy)

www.focus-stacking.ch

Änderungen:

Version:

15.06.2023

Focus_Stacking_PDF_74.docx (.pdf)

und

3.05.2022

Focus_Stacking_PDF_71.docx (.pdf)

und

09.04.2022

Focus_Stacking_PDF_70.docx (.pdf)

Diverse Korrekturen, Änderungen und Ergänzungen

Forenbeiträge wurden entfernt,

sie werden später in einem separaten Dokument veröffentlicht.

Stand 2022

In den vergangenen 15 Jahren habe ich viele Kameras und Objektive getestet und ausgemessen, dies mit einem grossen Zeit- und Kostenaufwand.
Seit 2019 verwende ich vorwiegend die gleich untenstehende, kostengünstige Ausrüstung, da sie eine sehr gute Abbildungsleistung erbringt.

Für das Vollformat mit Sensorgrösse 36 x 24 mm sind von unendlich bis 5mm Bildbreite seit einiger Zeit sehr gute Kameras und Foto-Objektive erhältlich.

Die hochauflösende (36MPixel) Vollformatkamera Nikon D810, die ich seit 7 Jahren verwende hat bis jetzt (2022) 400'000 Auslösungen ohne Probleme bewerkstelligt. Als gebraucht und revidiert, mit etwa 30'000 Auslösungen ist sie (2022) für unter CHF 1000.- erhältlich.

Das LAOWA 100mm F2.8 CA-Dreamer Macro 2x mit einem Neupreis von CHF 600.-, bietet von unendlich bis zu einem Abbildungsmassstab von 2:1 eine hervorragende Abbildungsleistung am Vollformat.

Das LAOWA 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro mit einem Neupreis von CHF 400.-, bietet von 2.5:1 bis 5:1 eine hervorragende Abbildungsleistung am Vollformat und kann mit 50mm Zwischenringen mit guter Abbildungsleistung bis zu 7:1 genutzt werden. Bei 7:1 beträgt die objektseitige Bildbreite am Vollformat 5.1 mm ($36\text{mm} / 7 = 5.1\text{ mm}$).

Der Kostenaufwand für Kamera und Objektive bis 7:1 beträgt somit etwa CHF 2'000.-.

Für eine objektseitige Bildbreite von bis zu 2mm sind weitere Kosten von etwa CHF 1'000.- bis 2'000.- notwendig.

Benötigt werden dazu vom Gebrauchtmart die beiden folgenden Objektive:

MITUTOYO M Plan Apo 10X/0.28 $\infty/0$ f=200

MITUTOYO M Plan Apo 20X/0.42 $\infty/0$ f=200

und als Tubuslinse eine Raynox DCR-150 für CHF 60.-.

Zusätzlich sind einige Adapter und Tuben notwendig, die jedoch nicht teuer sind.

Wer mehr Hintergrundinformation möchte, oder bereits eine andere Ausrüstung besitzt, für den können die folgenden Seiten von Interesse sein.

Inhalt

Stand 2022	2
Vorwort	5
An den Mikroskopiker	7
Dank	10
Wie natürlich wirkend sind Bilder mit Focus-Stacking?	11
Allgemein	12
Künstlerisch schön, oder wissenschaftlich informativ	14
Betrachtung und Fotografie	15
Bildbetrachtung	18
Analog, digital	21
8bit, 12bit, 14bit und 16bit	24
Schärfentiefe	25
Schärfentiefe bei Verwendung von Zwischenringen und Balgen	31
Schärfe, Auflösung	33
Auflösung und Vergrößerung	38
Anzahl und Grösse der Stackschritte	41
Okular, mit oder ohne?	42
Auflösungsreduktion durch Erschütterung	43
Dauerlicht oder Blitz	46
Belichtungszeit, Verwischung, Auflösungsreduzierung bei 20:1	47
Bildkreis	48
Auflösung, Kamera, Objektiv	51
Vollformat oder Kamera mit Crop-Faktor	53
Endlich- oder Unendlich-Objektive	57
Fliegenkopf-Fotografie	58
Arbeitsabstand, Auflösung	59
Vergrößerung	60
Bildausschnitt und Abbildungsmassstab	64
Beleuchtung	66
JPG oder RAW zu TIF, Belichtung (ETTR) und Histogramm	67
Blitz-Abbrennzeit, Verwendung mehrerer Blitzgeräte	77
Farbmanagement	84
Freier Arbeitsabstand und Objektivform	85
Zwischenringe und Balgen	86
Retro- und Tandemstellung von Fotoobjektiven	87
Telekonverter und Vorsatzlinsen	90
Kamera	92
4K UHD, mit Nikon D500	95
Kurze Geschichte der Linsen und Objektive	98
Objektive allgemein	99
ZEISS Luminar Lupenobjektive	102
Abblenden bei ZEISS Luminar	105
Luminare vor 105mm Makro Fotoobjektiv	109
Focus-Stacking 1:1 bis 9:1 mit Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven	110
Welches Objektiv, bei welcher Blende für welchen Abbildungsmassstab?	118
Objektiv-Liste 1:1 bis 60:1	119
Mikroskopobjektive	124
Mikroskopobjektive an Crop- und Vollformatkamera	125
Meine Beurteilung der Objektive nach ihrer Auflösung	127

Mikroskopobjektiv Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/-	129
Mitutoyo M Plan Apo Mikroskopobjektive	131
Auflösungssteigerung durch Panorama-Fotografie	134
Auflösungssteigerung der Bilder	138
Reduzierung der Anzahl Stackschritte	139
Schärfentiefe, Verlauf im Bild	140
<hr/>	
Test: Equipment-Teile selber testen	143
Test: Vorwort zum Test von Objektiven	144
Test: Abbildungsfehler, CA (Chromatische Aberration)	145
Test: Auflösung bei Objektiven	146
Test: Messen der Brennweite eines Objektivs	148
<hr/>	
Test: ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2	151
Test: Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens	153
Test: Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X	153
Literaturverzeichnis	158
Interessante Links im Internet	161
<hr/>	
Tabellen mit Formeln	162
Formeln	164
LeA (Liste einiger Abkürzungen)	167
Lieferanten	169
Kontakt, Haftungsausschluss	170

Vorwort

Karl Ludwig Friedrich von Reichenbach wurde 1788 in Stuttgart geboren und starb 1869 in Leipzig. Er war Chemiker, Naturforscher, Philosoph und Industrieller, 1830 entdeckte er das Paraffin.

1852, in der Zeit der Romantik, erschienen bei der Cotta'schen Verlagsbuchhandlung die "Odisch-Magnetischen Briefe" von Karl Ludwig Friedrich von Reichenbach.

Im 12. Brief "Odische Verladung und Durchleitung. Annäherung." schreibt er: Wenn man an einem Ende eines Kupferdrahtes mit einer Feile reibend darüber geht und das andere Ende sich im Dunkeln befindet, das Drahtende zu leuchten beginnt. Dies ist nur ein Beispiel vieler Versuche und Beobachtungen, die man im 12. Brief findet. Damals glaubte man jedem in einem Buch geschriebenen Wort, heute weiss man es besser, oder doch nicht und glaubt nicht jedem Wort, ... das im Internet steht?

Etwa 15 Jahre später erfand Werner von Siemens den Dynamo, wodurch es möglich war, aus Bewegung Strom zu erzeugen. Diesen leitete man mit Kupferdrähten zum Ort des Verbrauchers. Erst ab 1866 wurden Kupferdrähte in grösserer Anzahl (Länge) hergestellt und etwa weitere 35 Jahre dauerte es, bis ein Normalsterblicher in seiner Wohnung zu einer Stromzufuhr und so in den Besitz eines Kupferdrahtes kommen konnte, um so zu überprüfen, ob die Beschreibung von Karl von Reichenbach ihre Richtigkeit hat.

Es dauerte also doch recht lange, bis ein jeder die Beobachtung des Herrn Karl von Reichenbach widerlegen konnte!

Der Wissenschaftler Karl von Reichenbach entdeckte das nützliche Paraffin und das nicht bestätigte Verhalten des Kupferdrahtes.

In diesem Sinne möchte ich die Leser bitten, die nicht jeden der folgenden Versuche, Messungen und Vergleiche selber zu Hause nachvollziehen können, das Beschriebene nicht als der Wahrheit letzter Schluss zu interpretieren.

Nur weil man eine Aussage nicht überprüfen kann, heisst dies noch lange nicht, dass sie richtig ist!

Bei Erhöhung der Schärfentiefe durch Schliessen der Blende reduziert sich die Auflösung. Ebenfalls reduziert sich die Schärfentiefe, wenn stärker vergrössert wird. Focus-Stacking ist ein Verfahren, um in der Fotografie bei statischen Objekten die Schärfentiefe zu erhöhen und dies bei optimalster Auflösung.

Die Rede ist hier von Focus-Stacking in Auflichtfotografie im Bereich des Makro- und Mikroabbildungsmaassstabes (1:1 bis 100:1) bei gewölbten Objekten.

Ein Spezialgebiet der Fotografie, das für Fotografie-Anfänger nicht unbedingt geeignet ist. So setze ich bei der Beschreibung die Kenntnis fotografischer und mikroskopischer Gegebenheiten und Zusammenhänge voraus.

Das hier erwähnte bezieht sich auf Gegebenheiten die in der Praxis im Allgemeinen ihre Richtigkeit haben und somit nachvollziehbar sind.

Verfasst man ein Buch über Makro-, Mikrofotografie und Focus-Stacking, strebt man an, das Gebiet in seiner Gesamtheit zu beschreiben. Da man oft nicht selbst alles kennt, ausprobiert und gemessen hat, ist man teilweise auf das Wissen Dritter angewiesen. Hier in diesem PDF ist nicht alles über Makro-, Mikrofotografie und Focus-Stacking enthalten, sondern es beinhaltet einen Teil meiner in der Praxis gemachten Erfahrungen.

Das eigentliche Ziel der Fotografie ist, das resultierende Bild zu betrachten. Zusätzlich lernt der Fotograf durch die Auseinandersetzung mit dem Objekt, so wie der Maler oder Zeichner, sein Objekt besser kennen. Die Naturfotografie dient somit auch dem besseren Verständnis der Natur.

Je stärker optisch vergrößert wird, umso geringer wird bei maximaler Auflösung die Schärfentiefe. Sie wird so gering, dass das Objekt nur teilweise oder gar nicht mehr erkannt werden kann.

Die digitale Fotografie bietet mit Computersoftware die Möglichkeit, aus mehreren Bildern die einen unterschiedlichen Schärfebereich abbilden, ein Bild mit durchgehend hoher Auflösung anzufertigen. Diese Technik nennt man Focus-Stacking und ist "nur" für Objekte geeignet, die sich während der Anfertigung einer Serie von mehreren Bildern nicht bewegen!

Im Folgenden wird beschrieben, wie ich mit meiner Ausrüstung im Makro- und Mikrobereich (1:1 bis 100:1), Focus-Stacking anwende.

Ich weise darauf hin, dass dies nicht der einzig mögliche Weg ist!

Ich bin bestrebt bei den einzelnen Themen alle beteiligten Faktoren zu erwähnen, dennoch kann es sein, dass Bereiche zu wenig detailliert erläutert sind. Ich bitte deshalb den Leser, mir dies kund zu tun. Die deutsche Grammatik ist nicht unbedingt mein Freund, falls sich jemand über diese ärgert, soll er sich fragen, ob er dienlich sein könnte und das ganze PDF zu überarbeiten. Wenn dem nicht so ist, dann soll er die technisch interessante Information der deutschen Rechtschreibung vorgehen lassen und profitieren, von dem was das kostenfreie PDF an Positivem zu bieten hat. Ebenfalls ist es möglich, dass Fehler vorhanden sind, auch hier, im Interesse der Leser, bitte ich um Richtigstellung.

So wie man ein Objekt von unterschiedlichen Seiten, in unterschiedlichen Massstäben, unterschiedlicher Auflösung, also mit unterschiedlicher Erkennung der Details fotografieren kann, schreibe ich diese Zeilen.

Zusammenhänge werden aus unterschiedlicher Sicht wiederholt und unterschiedlich ausführlich beschrieben. Die Wiederholungen erlauben es somit auch, nur einzelne Kapitel nachzulesen und dennoch die Wirkung aller wichtigen Faktoren kennen zu lernen.

Der Betrachter, an den sich der Fotograf mit seinen Bildern wendet, kann berücksichtigt werden. Dient die Fotografie nur zum Kennenlernen der Fotografischen Technik oder zum Verständnis der Natur, dann ist man selbst der Betrachter, der ebenfalls Ansprüche an das Bild stellt. Der Betrachter muss deshalb immer berücksichtigt werden.

Man findet in meinen Beschreibungen diverse Spitzfindigkeiten, die einzeln betrachtet nicht von grosser Bedeutung sind, in ihrer Summe eingehalten jedoch Bilder ergeben, die sich in der Qualität von den üblichen Bildern klar sichtbar abheben.

Jedem Fotografen empfehle ich folgende Literatur:

Jost J. Marchesi

PHOTOKOLLEGIUM

Band 1 - 6

Verlag Photographie

D-82205 Gilching

ISBN 978-3-943125-44-3

"Sie dient zur Ausbildung zum Fotografen"

An den Mikroskopiker

Meine Zeilen richten sich an den Fotografen, der mit Focus-Stacking im vergrößernden Abbildungsmaßstab arbeitet.

Mikroskopiker die am Mikroskop Bilder anfertigen, richten sich nach entsprechender, bestehender Literatur der Mikroskopie! Ein Mikroskopiker wird vermutlich auf den folgenden Seiten nicht unbedingt dienliche Hinweise für die Fotografie am Mikroskop finden.

Ein gutes und teures Mikroskop mit Fototubus und qualitativ guter Kamera, ist für die Art der Fotografie wie ich sie betreibe und beschreibe, nicht die beste Lösung!

Die Anforderung für die Herstellung von Bildern, die dem natürlichen Objekt entsprechen, unterscheiden sich klar von den klassischen Anforderungen an das Bild in der allgemeinen Mikroskopie.

Wodurch sich meine Art der Fotografie von der Mikroskopie unterscheidet. Einige Beispiele, die den Unterschied klar machen.

Focus-Stacking:

Focus-Stacking ist eine Technik der Anfertigung und Bearbeitung von digitalen Bildern, sie erhöht die Schärfentiefe bei höchst möglicher Auflösung. Ein Mikroskopiker kann diese Technik bei der Betrachtung mit dem Auge, am Mikroskop nicht anwenden!

Da das Mikroskop für die Betrachtung mit dem Auge optimiert ist, kann es nicht gleichzeitig für die Fotografie mit Focus-Stacking optimiert sein. Eine Erhöhung der Schärfentiefe bei der Betrachtung am Mikroskop, wird durch eine niedrigere Apertur des Objektivs erreicht. Dadurch verringert sich aber die Auflösung. Focus-Stacking erhöht die Schärfentiefe bei gleichbleibender, hoher Auflösung. Daraus wird ersichtlich, dass beide Techniken bei der Optimierung z.T. andere Ansprüche stellen.

Das Objekt:

Die Reinigung des Objektes ist wichtig, Fremdkörper wie Staub und Schmutz werden entfernt. Das Objekt wird so gedreht, dass der Bildausschnitt, auch in seiner Vergrößerung, schön, wohl gestaltet als auch aussagekräftig ist. Oft sind die Objekte stark gewölbt. Alles so, dass die Natürlichkeit erhalten bleibt. Das Objekt wird weder geschnitten, eingefärbt noch sonst irgendwie speziell präpariert.

Das Licht:

Es wird diffuses Blitzlicht aus allen möglichen Richtungen verwendet. Bedingt frontales Licht, also nicht durch das Objektiv, Seitenlicht und Gegenlicht wirken durch einen Diffusor gleichzeitig, mehr oder weniger stark. Das Licht wird nie mit speziellen Reflektoren, Linsen oder Blenden beeinflusst. Es wird immer weisses Licht verwendet. Es wird nie mit Licht beleuchtet, das durch das Objektiv auf das Objekt gerichtet wird. Es wird nie polarisiertes oder solches einer bestimmten Lichtfarbe angewendet. Der Kontrast wird nicht durch eine spezielle Beleuchtungstechnik verstärkt, so wie es in der Mikroskopie oft angewendet wird.

Das Objektiv:

Für einen Bildausschnitt, der in Realität zwischen 36mm und 2.5mm beträgt, wird optimal eine Vollformatkamera mit Foto-, Vergrößerungs- oder Lupenobjektiv mit einem relativ grossen Bildkreis verwendet.

Ab einer Bildausschnittbreite die weniger als etwa 2.4mm beträgt, sind Mikroskopobjektive an einer Crop-Kamera (Faktor 1.5) die bessere Wahl. Mikroskopobjektive, die in der Bildmitte speziell hoch auflösen, bieten in den Bildecken eine schlechtere Bildqualität als

gute Mikroskopobjektive bei gleicher Vergrößerung (evtl. niedrigerer Apertur), die in der Bildmitte nicht so hoch auflösen.

Oft sind deshalb etwas ältere Mikroskopobjektive den moderneren, höher auflösenden, in der Fotografie vorzuziehen.

Noch zur Zeit der analogen Fotografie waren Objektive mit etwas höherem Kontrast von Vorteil. Bei der digitalen Fotografie, mit der einfachen und guten Möglichkeit der Bildbearbeitung, ist vom Objektiv nicht ein speziell hoher Bildkontrast gefordert, sondern eine hohe Auflösung mit möglichst wenig chromatischer Aberration. Ebenfalls ist eine plane Bildfeldkorrektur für Focus-Stacking nicht gefordert.

Gute Endlich-Mikroskopobjektive für die Metallurgie sind passend. Objektive die in den Bildecken gut abbilden, erreichen auch in der Bildmitte eine gute Qualität. Das Bildfeld ist dann einigermaßen gleichmässig in der Bildqualität und somit für Fotografie geeignet. Das Kriterium ist somit die Qualität in den Bildecken.

Beim Mikroskopieren und der Betrachtung mit dem Auge, kann jederzeit der gewünschte Bildausschnitt in die Bildmitte mit der besten Abbildungsleistung gerückt werden. Bei einem fertigen Bild kann weder der Ausschnitt verändert werden, noch zu einem höher auflösenden Objektiv gewechselt werden. Es muss deshalb ein Setup gewählt werden, das ein gleichmässig gut aufgelöstes Bild bis in die Ecken ergibt.

Das Okular:

Die Anpassung an das menschliche Auge erfordert in der Mikroskopie ein Okular.

Zusätzlich kann es noch Restfehler des Objektivs beheben. Ein Okular ist für die Fotografie nicht zwingend nötig, wenn das Objektiv weitgehend von Abbildungsfehlern befreit ist.

Die Kamera:

Typische Mikroskop-Kameras besitzen einen kleinen Fotochip, der nur den qualitativ besten Mittelbereich des Bildkreises eines Mikroskopobjektivs nutzt. Für die gleiche Bildbreite in Realität muss mit kleinem Foto-Chip entsprechend weniger vergrößert werden, was eine verminderte Auflösung zur Folge hat. Dies ist in der Mikroskopie kein Problem, denn bei gewünscht höherer Auflösung, wird das nächst höher vergrößernde Objektiv durch einfaches und schnelles Drehen des Objektivrevolvers gewählt.

In der Mikrofotografie, wie hier beschrieben, wird eine Kamera mit möglichst grossem Chip gewählt. Der gut abbildende Bildkreis des Objektivs muss möglichst gross sein. Dadurch ist für den gleichen Bildausschnitt eine höhere Vergrößerung notwendig, die das Objektiv entsprechend höher auflöst.

Der freie Arbeitsabstand:

Je kleiner der freie Arbeitsabstand gewählt werden kann, umso höher ist die Auflösung.

Hochauflösende Mikroskopobjektive besitzen deshalb einen kleinen freien Arbeitsabstand, dies ist bei Durchlicht kein Problem.

Bei der Auflicht-Fotografie wird aber zur besseren Beleuchtung ein möglichst hoher freier Arbeitsabstand angestrebt. Diese Umkehrung des Optimums ergibt eine andere Ausrüstung und Arbeitsweise.

Optischer Aufbau:

Der Mikroskopiker ist mit seinem Mikroskop an bestimmte und genormte Dimensionen mit seiner Ausrüstung gebunden. Focus-Stacking im Makro- und Mikrobereich mit Zwischenringen und Balgen, lässt mehr Freiheit im optischen Aufbau.

Aus den erwähnten Gründen wird sichtbar, dass Focus Stacking im Makro- und Mikrobereich und die Anfertigung von schönen Bildern, sich klar von der Technik des

Mikroskopierens mit Betrachtung per Auge unterscheidet und deshalb oft die Prioritäten etwas anders verteilt sind.

Dank

Mein Dank geht an:

- Heike Buchmann, die mit ihrem Können und ihrem Forum <http://www.focusstackingforum.de> sich speziell dem Focus Stacking widmet.
- Das Mikroskopie Forum <http://www.mikroskopie-forum.de> wo ich über Jahre von den Mitgliedern viele Hinweise und Hilfe erhalten habe.
- Thomas Conrad, der meinen zum Teil etwas holprigen Text gebügelt und die Rechtschreibung in Ordnung gebracht hat.
- Das Makro-Forum www.makro-forum.de

Wie natürlich wirkend sind Bilder mit Focus-Stacking?

Unser Auge bildet den zentralen Bereich des Blickfeldes (Fixierfeld) als scharf ab. Die Sehleistung nimmt vom Zentrum zum Randbereich sehr schnell ab.

Da das Auge immer in Bewegung ist und der Fokus stetig angepasst wird, kann uns das Gehirn ein Bildeindruck liefern, der frei von Unschärfe ist. Diesem gewohnten Seheindruck kommt Focus Stacking sehr nahe. Ebenfalls sind im vergrößernden Abbildungsmaßstab Bilder von Objekten möglich, die wir auch mit Lupe oder Mikroskop nicht so klar erkennen und mit durchgehender Schärfe betrachten können. Natürlicherweise sind alle Objekte immer scharf!

Ein einzelnes fotografisches Bild mit einem Schärfeverlauf in die Unschärfe, ist durch Linsen bedingt und somit eine starre Momentaufnahme. Es werden nicht wie beim natürlichen Sehen eine Vielzahl von Bildern mit unterschiedlichem Fokus zu einem Bild (im Gehirn) vereint. Bei Betrachtung eines fotografischen Bildes, im Bereich ausserhalb der Schärfentiefe, erkennt man eine "unnatürliche" Unschärfe.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (1960) haben einige Kunstmaler einen Schärfeverlauf in ihre Bilder aufgenommen, dies um den Eindruck einer Fotografie zu erwecken. Diesen Malstil nennt man Fotorealismus, also die Realität so wie sie durch Linsen projiziert wird.

- Franz Gertsch ist ein Künstler dieses Stils (1972 Documenta 5, Kassel). In seinem Bild "Gräser I" von 1995, hat er den Schärfeverlauf fotorealistisch gemalt. Gräser im Vorder- und Hintergrund sind unscharf, die Gräser im mittleren Bereich scharf.

- Ein in Europa sehr bekannter Vertreter des Fotorealismus ist Gottfried Helnwein.

- Chuck Close ging noch einen Schritt weiter, er vereinte in seinen gemalten, fotorealistischen Bildern den Schärfebereich von mehreren Fotografien mit unterschiedlichem Fokus (1972 Documenta 5, Kassel).

Von nah bis fern ist alles scharf, in etwa so wie Bilder im Stil des Naturalismus. Da seine Bilder eine Kopie von Fotografien waren und keinen eigenen Malstil erkennen lassen und extrem originalgetreu sind, zählt man ihn auch zu den Vertretern des Hyperrealismus.

- Wissenschaftliche Zeichnungen z.B. zur Beschreibung eines Insekts oder einer Pflanze, sind üblicherweise ebenfalls von durchgehender "Schärfe".

In der Fotografie entsteht der Schärfeverlauf durch die Projektion mit Linsen, der dreidimensionalen Realität, auf eine zweidimensionale Ebene.

Auch in der analogen Fotografie hat man schon mit sehr viel Aufwand den unterschiedlichen Schärfebereich mehrerer Bilder in einem Bild vereint.

In der digitalen Fotografie kann mit der Technik des Focus-Stacking der optisch bedingte Bereich der Schärfentiefe im Bild erweitert werden, dies nach Bedarf so stark, dass im Bild keine Unschärfe mehr sichtbar ist.

Das Vereinen von mehreren Fokusbereichen in einem resultierenden Bild, kommt somit nicht erst durch Focus-Stacking in der digitalen Fotografie zur Anwendung und ist deshalb in der Kunst schon lange anerkannt und etabliert.

Das Schöne und das Spiel mit dem Schärfeverlauf in einer Fotografie erübrigt sich durch die Technik des Focus-Stacking nicht, sondern Focus Stacking ist eine Ergänzung in der Fotografie.

Allgemein

Focus-Stacking ist ein Spezialgebiet der Fotografie, das Kenntnisse der Natur und deren Abläufe (Entwicklung), der Optik, der fotografischen digitalen Technik, der Computertechnik (Hardware und Software) und der grafischen Gestaltung fordert.

Also ist ein breit gefächertes Interesse und sehr viel Geduld gefordert.

Freude am Aufenthalt in der Natur und auch die Fähigkeit, zu Hause stundenlang am Fotoapparat und Computer zu verbringen sind nötig. Jede Jahreszeit ist dazu dienlich, nicht nur Frühling und Sommer sorgen für Beschäftigung, sondern auch der Winter ist geeignet, um sich z.B. mit Optik und Fototechnik intensiver durch Vergleichsaufnahmen zu beschäftigen. Für Beschäftigung ist also das ganze Jahr bestens gesorgt. Viel Zeit und Geduld sind Voraussetzung.

Wie in der Fotografie üblich, sind auch beim Focus-Stacking Vergleiche der Bilder bei unterschiedlichem Setup (Objektiv, Beleuchtung usw.) nötig. Dies gestaltet sich beim Focus Stacking sehr aufwendig, denn es können nur bedingt einzelne Fotos verglichen werden. Um verlässliche Vergleiche anzustellen, müssen bei unterschiedlichem Setup die ganzen Stacks angefertigt werden und auch die nötige aufwendige individuelle Bearbeitung der Bilder mit Software abgeschlossen sein, um aussagekräftige Vergleiche und somit Fortschritte zu erzielen.

Das sehr technikbelastete Focus-Stacking verleitet dazu, den Arbeitsablauf von Beginn an zu starten, man verwendet deshalb oft die bestehende Ausrüstung.

Daraus ergibt sich dann, mehr oder weniger zufällig, das resultierende Bild.

Hat man sich in die Technik des Focus-Stacking eingearbeitet, sollte es das Ziel sein, dass man sich von einem gewünschten Bild aus Gedanken macht, welches Setup benötigt wird, um zum Bild der Vorstellung zu gelangen.

So ist ebenfalls eine tiefergehende Auseinandersetzung mit dem Objekt dienlich. Der Anfänger nimmt ein Objekt, so wie er es vorfindet. Ist man etwas geübt, so erkennt man, dass vor allem Tiere und Pflanzen in ihrer Entwicklung unterschiedliche Stadien durchlaufen, die mehr oder weniger zum erfolgreichen Bild geeignet sind. Es kann somit sein, dass ein Objekt zu einer bestimmten Jahreszeit fotografiert wird. Dienlich dazu ist die wiederholte Beobachtung im Laufe des Jahres, um dann zur richtigen Jahreszeit mehrere Exemplare (dies vor allem bei Pflanzen) zu präparieren.

Bei Tieren empfehle ich das Auge und die Geduld zu schärfen und im richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort, verstorbene Tiere zu suchen.

Wichtig ist ebenfalls die Vorbereitung des Objektes. Oft muss es gereinigt, die passende Perspektive, der Bildausschnitt bestimmt und die damit verbundene Befestigung mittels Halterung bewerkstelligt werden. Dies erfolgt mit Lupe oder unter dem Binokular.

Im Bereich der Makro- und Mikrofotografie befindet sich der Fotograf sehr oft mit seinen Forderungen am Limit der machbaren optischen und mechanischen Möglichkeiten.

Es ist deshalb nötig, alle Faktoren die zu einem besseren Bild beitragen können, zu berücksichtigen. Dies ist oft bei den einzeln optimierten Faktoren nicht gut sichtbar, jedoch ist die Summe aller optimierten Faktoren im Bild klar sichtbar.

Im weiten Bereich des Focus-Stacking tauchen oft Fragen auf, deren Antwort man auch nicht im Internet mit Recherchieren findet.

Im deutschsprachigen Gebiet, Deutschland, Österreich und der Schweiz, sind die folgenden Foren zu empfehlen:

- Das Makro-Forum widmet sich auch dem Focus Stacking im Makro- und Mikrobereich bei Tieren und Pflanzen.

www.makro-forum.de

- Für Fragen und Hinweise im Bereich der Mikrofotografie empfehle ich auch das Mikroskopie-Forum

www.mikroskopie-forum.de

- Für alle Bereiche des Focus-Stacking empfehle ich das Focus Stacking Forum,

www.focusstackingforum.de

Künstlerisch schön, oder wissenschaftlich informativ

Ein Wissenschaftler will nicht nur einen Überblick, sondern ebenfalls die kleinsten Details naturgetreu sehen. Focus-Stacking versucht in erster Linie, Bereiche der höchsten Auflösung aus unterschiedlichen Bildern in einem Bild zu vereinen. Damit dies gelingt, müssen oft einzelne Bereiche durch die Stacking-Software innerhalb des Bildes in der Grösse verändert werden. Das Bild wird somit in Bereichen unterschiedlich verzogen. Für wissenschaftliche Zwecke sind solche Bilder nur bedingt zu gebrauchen. Auch deshalb wende ich mich hier eher an die Herstellung künstlerisch schöner Darstellungen und verzichte somit auf einen hohen wissenschaftlichen Wert.

Dies bedeutet, dass die Bildgestaltung berücksichtigt werden kann und im Interesse des Gefallens, Farben angepasst und kleine Unschönheiten entfernt werden können oder sollen. Die Bilder können dokumentarischen Wert besitzen, indem sie arttypische oder ungewöhnliche Situationen und Abläufe zeigen oder auf die Schönheit hinweisen. Daraus soll sich ein erhöhtes Interesse an der Natur ergeben und ein schonender Umgang mit ihr die Folge sein.

Ein Bild soll nicht nur ein Eyecatcher (Blickfang, Hingucker) sein, sondern auch zum Verweilen anregen. Der Gesamteindruck kann schön, die Details interessant und informativ und somit den Betrachter anziehen und beschäftigen. Je länger der Betrachter das Bedürfnis hat es zu betrachten, oder er es öfter betrachten möchte, umso wertvoller kann man das Bild bezeichnen. Entdeckt der Betrachter bei mehrmaliger Ansicht immer wieder neue Details, dann findet das Bild hohes Interesse.

Besitzt ein Bild einen hohen dokumentarischen Wert, dann darf die Bildqualität etwas schlechter sein (Schnappschuss). Ein Erinnerungsfoto kann für den Fotografen einen hohen Wert besitzen, während ein fremder Betrachter seinen Sinn nicht finden kann.

Der Fotograf sollte sich immer bewusst sein, weshalb er fotografiert, auch Testaufnahmen oder sich am Fotoapparat zu üben, ergeben sinnvolle Bilder.

Betrachtung und Fotografie

Mit Betrachtung ist in diesem Falle, das Beobachten mit dem Auge durch ein Mikroskop, Binokular, Feldstecher oder Fernrohr gemeint. Dies unterscheidet sich erheblich von der Anfertigung einer Fotografie in diesen Bereichen.

Bei der Betrachtung durch Linsen und Objektiv wird das gewünschte Objekt in die Bildmitte gerückt, oder das Objektiv so ausgerichtet, dass das Objekt in die Bildmitte zu stehen kommt. Ebenfalls besitzt unser Sehfeld (Gesichtsfeld) in der Bildmitte die höchste Auflösung. Beträgt die Sehschärfe bei 0° also geradeaus 100%, so beträgt sie bei einem seitlichen Winkel von -10° oder $+10^\circ$ nur noch 20%. Daraus folgert, dass bei Betrachtung durch Linsen eine möglichst hohe Auflösung in der Sehfeldmitte gefordert ist und ein Absinken der Auflösung zum Sehfeldrand nicht als sehr störend empfunden wird.

Bei dem aus der Fotografie erfolgten Bild, das wir in Ruhe betrachten können und Details nacheinander in der Bildmitte bis zum Bildrand betrachten können, ist eine möglichst gleichbleibende Auflösung gewünscht.

Dieser Unterschied, zwischen Betrachtung durch Linsen und Fotografie, ist bei der Anschaffung oder Gebrauch einer optimalen Ausrüstung für Fotografie zu berücksichtigen. Gute und somit speziell in der Bildmitte hochauflösende Mikroskopobjektive sind nicht unbedingt für die Fotografie geeignet, denn ihre mögliche Randunschärfe kann auf Fotos störend wirken.

Die annähernd maximale optische Auflösung bei Linsensystemen wurde bereits Ende des 19. Jahrhundert erreicht, dies allerdings nur in der Sehfeldmitte! Für Fotografie war es später möglich die Randauflösung zu erhöhen, dies allerdings etwas zu Ungunsten der Auflösung in der Bildmitte. Das Ergebnis ist ein in der Auflösung gleichmässigeres Bild.

Aus den erwähnten Gründen verwundert es somit wenig, dass nicht jedes Mikroskopobjektiv für Fotografie geeignet ist.

Ein Objektiv muss also nicht nur gut, sondern auch für Fotografie geeignet sein! In der Mikroskopie ist das Angebot an Objektiven sehr hoch, sie sind für spezielle Beleuchtungsmethoden (Hell- und Dunkelfeld, Kontrastverfahren u.s.w.) angefertigt und ihre Qualität kommt oft nur zum Tragen, wenn auch die entsprechenden Zwischenlinsen oder / und passende Okulare verwendet werden.

Für die Fotografie verwende ich deshalb Mikroskopobjektive, die speziell für Auflicht (etwas erhöhter freier Arbeitsabstand) und ohne Zwischenlinse oder / und Okular ihre optimale Leistung zeigen. Man nennt sie auch voll auskorrigierte Mikroskopobjektive. Es gibt auch Mikroskopobjektive die einen extrem hohen freien Arbeitsabstand besitzen, dieser Abstand geht aber auf Kosten einer hohen Auflösung.

Gut sichtbar ist dies bei Binokularen, die üblicherweise einen freien Arbeitsabstand von etwa 100mm besitzen. Sie sind mit zwei Objektiven und zwei Okularen so konstruiert, dass mit dreidimensionaler Sicht am Objekt gearbeitet werden kann, also genügend Platz für Hände mit Werkzeug besteht.

Unendlich-Mikroskopobjektive benötigen zur Bildbildung eine zweite Optik. Sie bieten die Möglichkeit, unterschiedliche und mehrere Filter im weitgehend parallelen Strahlengang in einem weiten Bereich anzubringen. Dies im Gegensatz zu den Endlich-Objektiven wo die Anbringung sehr heikel und zum Teil unmöglich ist.

Unendlich-Objektive besitzen somit eine spezielle Eigenschaft, die normalerweise beim Focus-Stacking nicht benötigt wird. Dieser grosse Vorteil bringt mit sich, dass die grossen

Hersteller in Zukunft die optischen Fortschritte in Unendlich-Objektive einfließen lassen und die Produktion von Endlich-Objektiven einstellen werden.

Ebenfalls sind PLAN-Mikroskopobjektive, die bei optimal eingestellter Auflösung in der Bildmitte ebenfalls die optimale Auflösung am Bildrand zeigen, nicht zwingend für Focus-Stacking nötig.

Gut für Focus-Stacking (10:1 bis 100:1) geeignet sind Mikroskopobjektive die für die Metallurgie berechnet sind. Dies sind Auflicht-Objektive, die einen zur Beleuchtung genügend grossen freien Arbeitsabstand besitzen. Werden annähernd voll farbkorrigierte (betreffend CA) Endlich-Mikroskopobjektive (CF) verwendet, kann ihr Bild direkt, also ohne weitere Linsen, auf den Fotochip projiziert werden.

Im Makro Bereich (1:1 bis 10:1) werden oft Vergrösserungs- und Repro-Objektive empfohlen. Diese Objektive sind ebenfalls für die Projektion auf absolut planliegendes Fotopapier, auch für einen extrem grossen Bildkreis oder für die Fotografie von planen Objekten berechnet. Ihr extrem grosser Bildkreis geht bei einfachen Objektiven oft mit einer etwas minderen Auflösung einher. Es sei jedoch speziell erwähnt, dass gute Vergrösserungs- und Repro-Objektive die Abbildungsleistung von Lupenobjektiven übertreffen können, jedoch ist dazu oft ein langer Auszug (Balgen) notwendig.

Im Makrobereich bieten sich Lupenobjektive (z.B. ZEISS Luminar) an, die speziell für Mittelformat-Fotografie bei diesem Abbildungsmassstabs-Bereich berechnet sind. Sie besitzen eine Blende, die durch leichtes Schliessen einen geringen Auflösungsverlust ergeben, doch wird dadurch die Schärfentiefe erhöht.

Objektive die für die Betrachtung berechnet sind (z.B. Mikroskopobjektive), weisen oft einen hohen Kontrast auf, so dass mit blossem Auge kleinste Details gut erkannt werden. Es entsteht dadurch der Eindruck von höherer Schärfe, die Auflösung ist aber nicht unbedingt höher. Auch diese Eigenschaft wird für Focus-Stacking mit anschliessender Bildbearbeitung nicht benötigt, ist sogar eher ein Nachteil. Mit Bildbearbeitung kann der Kontrast (Schärfeeindruck) jederzeit erhöht, aber nicht vermindert werden. Natürlich wirkende Bilder sind nicht kontrastverstärkt.

Im Bereich zwischen 10:1 bis 100:1 stehen vorwiegend Mikroskopobjektive zur Verfügung. Sind mit Focus-Stacking Bilder erwünscht, die weitgehend natürliche Farben und Kontrast besitzen, dann eignen sich "hochgezüchtete moderne Superobjektive" weniger, da sie sehr poppig und kontrasthart abbilden. Objektive älteren Datums zeichnen flauer, was aber nicht bedeutet, dass sie weniger hoch auflösen. Knackige Bilder können, falls erwünscht, mit der Bearbeitung erzeugt werden.

Zur Zeit der analogen Fotografie gab es einen sehr bekannten Hersteller, der sehr scharf zeichnende Fotoobjektive herstellte. Da zu dieser Zeit die Möglichkeit der Bildbearbeitung gering war, oder gar nicht bestand z.B. bei Dias, waren diese Objektive trotz des hohen Preises sehr beliebt. Sie lösten zwar nicht unbedingt höher auf, sondern ihr Kontrast war höher und somit der Bildeindruck schärfer.

In der jetzigen Zeit der digitalen Technik bieten diese Objektive keinen nennenswerten Vorteil mehr, denn mit Bearbeitung kann sowohl der Schwarzweiss- wie der Farbkontrast mit Software erhöht werden. Von Vorteil sind jetzt eher Objektive, die etwas flauer und somit oft mit höherer Auflösung abbilden. Die feine und natürliche Abstufung der Helligkeits- und Farbwerte kommt speziell bei der Aufzeichnung im RAW Format zur Geltung.

Die einfachste Art ist die direkte Projektion mit Endlich-Mikroskopobjektiven, die betreffend der chromatischen Aberration, nahezu voll auskorrigiert sind.
Es sind dies die Objektive mit der Bezeichnung "CF" und auch die Nikon M-Plan. Dazu wird kein Mikroskop benötigt, sondern die Objektive werden am Balgen oder Zwischenringen ohne weitere Linsen montiert.

Bildbetrachtung

Im Konzertsaal, beim Anhören eines Symphonie-Orchesters, gibt es einen bestimmten Sitzplatz, um das Klangerlebnis optimal zu geniessen. Die seitliche Ausrichtung ist in der Mitte, nicht zu nah am Orchester und nicht zu weit weg, damit die Reflexionen der Wände den Direktschall nicht zu sehr übertönen.

Sitzt man im Kino in den vordersten Reihen, ist man wohl mitten im Geschehen, muss aber oft den Kopf etwas hin und her drehen, was mit der Zeit lästig werden kann. Auf den hintersten Reihen hat man jederzeit einen uneingeschränkten Überblick des Bildes. Die etwas weite Entfernung ist für ältere Betrachter, die sich nicht mehr so stark der Nachbarsperson widmen, weniger geeignet. Ältere Personen besitzen oft einen etwas eingeschränkten Blickwinkel, sitzen deshalb vorzugsweise nicht zu nahe bei der Leinwand und doch nicht zu weit hinten, damit sie die Details noch erkennen können.

Fernseher und Monitore gibt es in unterschiedlichen Grössen, damit eine unterschiedliche Anzahl von Betrachtern im Idealabstand, der ein Mehrfaches der Bilddiagonale ist, Platz finden können. Ein Betrachter kann nahe an das Gerät rücken, es kann deshalb kleiner sein, als wenn mehrere Personen vor dem Gerät sitzen.

Betrachtet man die Sehgewohnheiten, dann fällt auf, dass junge Betrachter die über genügend finanzielle Mittel verfügen, eher zu grossen Fernsehern und Monitoren neigen, um sich so näher im Geschehen zu befinden.

Als optimaler Betrachtungsabstand bei bewegten Bildern (Film) gilt in etwa das dreifache der Bilddiagonale.

Oft wird dies auch für stehende Bilder (Gemälde oder Fotos) als ideal beschrieben. In Kunstmuseen kann man oft beobachten, wie sich die Betrachter in die optimale Distanz begeben. Auch hier fällt aber auf, dass das Bild nicht nur aus dieser Distanz betrachtet wird, oft begibt sich der Betrachter einige Schritte näher, verliert dabei den Bildüberblick, erkennt aber die Details besser. Aus diesem Grund macht es Sinn, wenn eine Fotografie höher aufgelöst ist, als es beim Normalabstand mit Überblick des ganzen Bildes nötig wäre!

Oft wird erwähnt, dass 5 Mega-Pixel für ein Bild genügen und man mit 7 MP allerbestens bedient ist. Dies bezieht sich auf die Betrachtung mit einer Distanz vom dreifachen der Bilddiagonale und geht davon aus, dass die Kamera 7 MP hundertprozentig auflöst. Diese Bedingungen treffen aber nie zu! Interessierte Betrachter, das sind diejenigen die man als Fotograf ansprechen möchte, können es nicht lassen, ein Bild auch von näher zu betrachten. Es macht für den Fotografen somit Sinn, ein Bild möglichst hoch aufgelöst anzufertigen.

Die obere Grenze der Auflösung ist durch die optischen Gesetze bei der Optik gesetzt. Der Fotograf muss allerdings eine Kamera wählen, die die gesamte analoge Information, die die Optik liefert, digital festhalten kann.

Die Optik ist ein analoges Bauteil, während die Kamera digital aufzeichnet. Messwerte der Optik betreffend Auflösung geben an, wie viele Zeilen mit einem Kontrast von mindestens 10% übertragen werden. Diese Werte berücksichtigen nicht, dass das Objektiv auch Linien übermittelt, die weniger als 10% des maximalen Kontrastes besitzen. Wählt man also eine digitale Kamera, die entsprechend den Daten eines Objektivs auflöst, werden alle Informationen die ein Objektiv mit weniger als 10% Kontrast übermittelt, nicht erfasst. Des Weiteren ist zu beachten, dass eine digitale Kamera mit einer Bildbreite von 6000 Pixeln, selten 3000 Linienpaare auf die Bildbreite auflösen kann.

Die professionelle Fotografie begann einst bei einem Bildformat von mindestens 6x6cm, auch Mittelformat genannt, grössere Formate im Bereich von einer Kantenlänge über 9cm und mit Planfilm, nannte man Grossformat.

Das heute digital verwendete Vollformat (24x36) nannte man zur analogen Zeit Kleinbildformat. Selbst wenn eine digitale Vollformatkamera der Auflösung einer analogen Kleinbildkamera gleichkommt, so ist noch lange nicht die oberste Grenze der Messlatte erreicht. Man bedenke, dass zur analogen Zeit Planfilm-Negativformate bis zu 35.6 x 50 cm verwendet wurden und dies war nicht sinnlos!

In der digitalen Fotografie wird es als normal betrachtet, dass ein Bild in der Kamera oder bei der Bearbeitung geschärft wird. Bildet man ein von der Optik übertragenes Linienpaar nicht nur mit 2 Pixeln ab, sondern mit 6-8 Pixeln, dann ist so wie einst zur analogen Zeit, ein Nachschärfen nicht nötig. Dies bedeutet, dass 3000 Linienpaare, entsprechend den Messwerten der Grenzauflösung einer Optik, für eine optimale Darstellung ohne Nachschärfen, eine digitale Kamera benötigt, die auf die Bildbreite 9000 bis 12000 Linienpaare abbilden kann.

Um die oben erwähnten 5 MP eines Bildes sauber zu erreichen (ohne Nachschärfung) benötigt es also eine Kamera, deren Chip mindestens 45 bis 80 Mega Pixel besitzt. Es wird somit verständlich, weshalb die professionelle Fotografie Mittelformatkameras mit digitalen Rückteilen herstellt, die 80MP besitzen (Mamiya Leaf Credo 80 Digital back). Hasselblad fertigt Kamera-Rückteile die durch Verschieben des Fotochips, aus 6 Aufnahmen (Multi-Shot) mit einem 50MP Chip, Bilder mit bis zu 200 MP ausgeben. Der von Spöttern genannte Pixelwahn macht also Sinn.

Das oben erwähnte gilt für die verkleinernde Fotografie. Sobald optisch vergrössert wird, also mit einem Abbildungsmaßstab von 2:1 oder stärkerer Vergrößerung fotografiert wird, werden Kameras benötigt, deren Fotochip mit zunehmendem Abbildungsmaßstab weniger Pixel besitzen. Bei Mikroskopobjektiven sind bedingt durch den kleineren Bildkreis, kleinere Fotochips angebracht.

Beim Mikroskopieren wird der gewünschte Bildbereich in die Bildmitte gerückt, deshalb ist ein kleinerer Bildkreis nicht nachteilig, aber massiv preisgünstiger. In der Fotografie wird ein hoher Bildinhalt angestrebt, es ist deshalb sinnvoll einen etwas grösseren Bildkreis zu nutzen. Dazu eignen sich Digitalkameras mit Crop-Faktor 1.5 oder je nach fotografiertem Objekt (z.B. wenn es kreisförmig ist) sogar Vollformatkameras.

Die ZEISS Axiocam 506 color mit 6 Megapixel besitzt eine Chipdiagonale von 16mm (1 Zoll Sensor, $12.8 \times 9.3 = 119\text{mm}^2$) bei einem Pixelpitch von $4.54 \mu\text{m}$, die Nikon 7100 besitzt eine Chipdiagonale von 28mm ($23.5 \times 15.6 = 367\text{mm}^2$) bei einem Pixelpitch von $3.9 \mu\text{m}$. Lässt man grob gerechnet den leicht unterschiedlichen Pixelpitch ausser Acht und beachtet nur die Grösse des Chips, dann ist die Fläche bei der Nikon Kamera etwa 3 Mal grösser und benötigt somit 3 mal mehr Pixel, also $3 \times 6 = 18\text{MP}$. Da die Nikon D7100, 24MP besitzt, kann sie deshalb mit gutem Gewissen mit Mikroskopobjektiven verwendet werden. Ob man sich, bedingt durch den grösseren genutzten Bildkreis, an der abnehmenden Bildqualität im Randbereich stört und wie weit sie je nach fotografiertem Objekt zur Wirkung kommt, muss der Fotograf anhand des erstellten Bildes entscheiden. Bei 100:1 benötigt es mit einer 1.5 Faktor Crop-Kamera und Ausnutzung eines Bildkreises mit einem Durchmesser von 28 mm (660 LP/BB), für eine sehr gute Bildqualität etwa eine Kamera mit 10.4 MP (6 Pixel/Linienpaar).

In der mikroskopischen Fotografie wird oft ein Bildkreis von 18mm genutzt, was im Gegensatz zu einem Bildkreis von 28mm einer Fläche entspricht, die nur 41% beträgt. 41% eines 10.4 MP Chips sind 4.3 Mega Pixel.

Dazu reicht eine ZEISS Axiocam 506 color mit 6 Megapixel gut aus.

Bei 10:1 sind es in der Bildbreite auf einem 1.5 Faktor Chip 2500 LP/BB, dazu benötigt es für eine Abbildung mit 2 Pixeln pro Linienpaar einen Chip mit 16 MP. Mit einem Bildkreis von 18mm (41% Bildfläche) entspricht dies 6.6 MP.

Verwendet man dazu eine ZEISS Axiocam 506 color mit 6 Megapixeln, dann wird ein Linienpaar ebenfalls mit etwa 2 Pixeln abgebildet.

Oft wird bei der digitalen Fotografie bemängelt, dass bei Ausdrucken nicht die hohe Auflösung der Bilder der analogen Fotografie erreicht wird.

Ich bin zwar der Meinung, dass die digitale Fotografie ebenbürtig bis besser ist, doch allgemein scheint da noch eine Unklarheit zu bestehen.

Zur analogen Zeit wurden Bilder oft im Format 9x13cm auf Fotopapier belichtet. Die ideale Betrachtungsdistanz beträgt etwa der Länge der Bilddiagonale und somit etwa 16cm.

Da viele Menschen mit so einer kurzen Betrachtungsdistanz Probleme haben, betrachteten sie das Bild von einer etwas grösseren Distanz, ca. 25cm.

Bei einer Betrachtungsdistanz von 25cm kann man mit einem Blick ein Bild in der Grösse von 15x20cm (ideale Betrachtungsdistanz) überblicken. Bildabzüge einer Kleinbildkamera auf Fotopapier in dieser Grösse, vor allem wenn es ganze Filme waren (36 Bilder), kosteten sehr viel und deshalb wurden Bilder in der Grösse von 15x20cm angefertigt und bei Bedarf einzelne Bilder vergrössert. Vergrösserungen auf Fotopapier 20x30cm (ca. A4) waren schon recht teuer. 50x70cm war für zu Hause oder Fotoausstellungen schon luxuriös und wurden nur sehr selten gemacht. Sie dienten auch dazu, dass man das Bild aus einer grösseren Distanz (ideale Betrachtungsdistanz = Bilddiagonale) betrachtet werden konnte und dies von mehreren Betrachtern zur gleichen Zeit. Bei Einhaltung der idealen Betrachtungsdistanz (Bilddiagonale) erkennt man deshalb bei grösseren Bildern nicht mehr Details, ausser man geht einen Schritt näher und verliert dabei den gesamten Bildüberblick.

Weil analoge Bilder eher klein waren und man deshalb eine grössere Betrachtungsdistanz wählte, kam man nicht in den vollen Genuss aller Details. Ausdrücke von digitalen Bildern sind um einiges preisgünstiger als analoge Abzüge (Vergrösserungen) auf Fotopapier. Deshalb werden digitale Bilder eher grösser ausgedruckt als analoge Bilder vergrössert wurden. Es ist bei digitalen Ausdrucken deshalb auch eher möglich, eine Betrachtungsdistanz entsprechend der Bilddiagonale einzuhalten. Dadurch werden Details auch eher erkannt.

Falls es tatsächlich so wäre, dass die analoge Fotografie mehr Details zeigt, käme man oft nicht in den Genuss dieser Details, da man aus Kostengründen dazu geneigt war, die Bilder klein anfertigen zu lassen und sie von einer grösseren Distanz zu betrachten.

Analog, digital

Ein analoges Signal verhält sich im Anstieg wie ein kontinuierlich ansteigender Weg, ein digitales Signal muss mit einer Treppe verglichen werden.

Sind die (digitalen) Treppenschritte 18cm hoch, dann kann ein alter Mensch, der seine Füße nur 17cm anheben kann, die Stiege nicht hochsteigen, jedoch mit einer Rampe (analog) kann er einen grossen Höhenunterschied bewältigen.

Ein AD-Wandler (Analog-Digital-Wandler) rechnet analoge Signale in digitale um. Dazu benötigt es ein analoges Signal, das mindestens so gross ist, dass der Schwellenwert im Wandler überschritten ist und somit am Ausgang ein Signal von 1 ausgegeben wird.

Beträgt z.B. das analoge Signal einen Wert von 0.95 dann ist der digitale Wert = 0.

(Folgenden Artikel, betreffend der Auflösung in der analogen und digitalen Fotografie, empfehle ich zu lesen:

<http://www.badenhausen.net/rolf-badenhausen/Pixelmania.htm>)

Betrachten wir dies nun mit Licht, das durch das Objektiv zum Fotochip gelangt und im JPG Bildformat ausgegeben wird. Benötigt der dunkelste der 256 Grauwerte ein vom Licht erzeugtes analoges Signal von 1 und wird somit digital als eine 1 ausgegeben, dann wird alles was etwas dunkler ist, also ein Lichtwert von z.B. 0.95 als 0 und somit als kohlenraben-schwarz digitalisiert. Es ist somit absolut nichts vorhanden. Öffnet man nun

die Blende um einen Wert (doppelte Lichtmenge) dann ergibt sich ein analoges Signal von $2 \times 0.95 = 1.9$. Nun gibt der AD-Wandler den Wert 1 aus, also den dunkelsten Grauwert.

Während beim analogen Signal eine klar verständliche und mathematisch logische Verdoppelung des Wertes eintritt, wirkt das digitale Verhalten, bedingt durch einen nötigen Schwellenwert, etwas befremdend, da kommt man auf die Rechnung $0 + 0 = 1$.

Erhöht man nun die Lichtmenge weiter mit der Blende um nur 6% also von 1.9 auf den Wert 2.014 dann gibt der AD-Wandler den Wert 2 aus, also doppelt so viel wie wenn der analoge Wert bei 1.9 ist. Aus einer analogen Differenz von 6% wurde im Digitalen eine Steigerung um 100%. So werden analoge Signale von 1.0 bis zu einem Wert von minimal unter 2.0, digital als Wert 1 ausgegeben und somit der ganze Bereich der feinen analogen Abstufung zu einem gleichgrossen digitalen Wert egalisiert. Es entsteht aus einem kontinuierlich ansteigenden Lichtsignal ein stufenförmig ansteigendes digitales Signal.

Hebt man nun bei der Bearbeitung eines digitalen Signales den Lichtwert eines Bereiches minimal an, z.B. alles was den Lichtwert 210 besitzt wird auf 211 aufgehellt, gibt es somit keine Pixel mehr, die den Wert 210 besitzen und daraus ergibt sich dann in einem einst digital gleichmässigen stufenförmigen Verlauf plötzlich Stufen, die von 209 um 2 Stufen auf 211 springen. Ab einer gewissen Stufengrösse ist dies im Bild als schnelle

Helligkeitsveränderung, dem sogenannten Tonwertabriss erkennbar. Um all diesem unschönen Verhalten bei der Umwandlung von analog zu digital entgegenzuwirken, ist eine hohe Auflösung der Tonwerte bei der Umwandlung anzustreben. So kann zum Beispiel beim AD-Wandler der Schwellenwert gesenkt und die Auflösung der Tonwerte erhöht werden. Es werden dann z.B. schon Lichtwerte von 0.1 erkannt und als 1 ausgegeben und bei einem Lichtwert von 0.2 beträgt dann das digitale Signal schon 2. Dadurch wird die Auflösung des Signales erhöht.

Dies geschieht in der Fotografie, wenn an Stelle des JPG Signales das mit 8bit abgespeichert wird, im RAW oder TIF Format mit 12 oder 14bit fotografiert wird.

Bei **8bit können 256** unterschiedliche Werte (Graustufen) zwischen Schwarz und Weiss erfasst werden, bei **12bit sind es 4096** und bei **14bit sogar 16384**.

Um sicher nicht überzubelichten ist ein Abstand zum hellsten Wert von 1-2 Blenden üblich.

Dadurch reduziert sich bei JPG die Anzahl der schon wenigen

Grauwertstufen zusätzlich, was bei der Bearbeitung hinderlich ist und im Bild auch als Artefakte sichtbar wird.

Besitzt ein Bild, das mit einer Farbtiefe von 14bit (16384 Grauwertstufen) aufgenommen wurde im Histogramm nur einen schmalen Berg im Helldunkel-Bereich, dann besitzt dieser immer noch mehrere Tausend von Grauwertstufen und kann deshalb ohne erkennbare Tonwertabrisse auf den gesamten Helligkeitsbereich zwischen Schwarz und Weiss mit Software (Tonwertspreizung) ausgedehnt werden. Es ist dann immer noch ein Mehrfaches an Grauwertstufen vorhanden, als das Maximum des JPG (8bit) Formats besitzt. Speziell bei Focus-Stacking, wo oft eine starke Bearbeitung mit Software gefordert ist, wirkt sich eine hohe Farbtiefe (hohe Anzahl von Tonwertstufen) als äusserst nützlich aus.

Dass das im TIF (16bit) Format fertig gestellte Bild am Ende zur Präsentation im Internet ins JPG (8bit) Format umgewandelt wird, widerspricht nicht der Tatsache, dass das beste Ergebnis bei der Aufnahme (RAW, TIF) und Bearbeitung im TIF (16bit) Format erzielt wird!

Der Umwandlung von analogen Signalen in ein digitales Signal ist somit eine möglichst hohe Bedeutung beizumessen.

Ein Beispiel aus der Audio-Technik, die hörbare Signale bis zu einer Frequenz von 20KHz übermitteln möchte. Hier wird bei der AD-Umwandlung zur Auflösung der höchsten Frequenzen eine Abtastrate (Samplingfrequenz) von 44.1kHz verwendet, obwohl die meisten Menschen nur eine Tonhöhe bis etwa 15kHz hören. Eine Frequenz wird bei der Umwandlung von analog zu digital also dreimal so hoch abgetastet wie ihr Maximum hörbar ist.

Schon die analoge Fotografie reduzierte die Abbildung der optisch analogen und kontinuierlichen Information des Objektivs auf das punktförmig angeordnete Korn. Die Helligkeit eines Punktes wurde analog, doch die Bildfläche wurde in Punkten festgehalten.

Von links nach rechts und von oben nach unten oder umgekehrt wurde das optisch kontinuierlich verlaufende optische Bild in Punkte gerastert. Von Punkt zu Punkt (Korn zu Korn) veränderte sich die Helligkeit oder Farbe in Schritten, also nicht natürlich kontinuierlich.

Je mehr Punkte (Korn) auf der Bildfläche des Kleinbildes vorhanden waren, umso kleinere Details konnten gezeichnet werden. Das Korn ist somit in seiner Flächenausdehnung mit einem Pixel des modernen Fotochips vergleichbar. Je grösser, umso lichtempfindlicher, je kleiner, umso mehr Details können wiedergegeben werden. Lichtempfindliche Filme waren grobkörnig, feinkörnige benötigten mehr Licht.

Ein analoger Dia-Kleinbildfarbfilm ist von der Auflösung mit einer heutigen 24-36MPixel Digitalkamera vergleichbar, zusätzlich mit dem digitalen Vorteil, dass bei wenig Licht nicht ein anderes Filmmaterial verwendet werden muss.

Betrachtet man ein Bild in einem Abstand, so dass mit einem Blick das ganze Bild überschaubar ist, dann reichen in der Auflösung 6MPixel. Tritt man einen Schritt näher oder verkürzt man die Betrachtungsdistanz um weitere Details zu sehen, dann benötigt das Bild weit mehr Pixel als 6 Millionen. Ebenso ist es in der Fotografie nichts neues, dass man den Bildausschnitt anpasst (reduziert) oder Ausschnitte verwendet. Auch in diesem Falle macht sich eine Kamera mit 36MPixel nützlich. Ich erinnere gerne an das 6x6cm Filmformat. Es diente nicht unbedingt dazu, quadratische Bilder zu zeigen, sondern sein grosser Vorteil war, dass sich der Fotograf im Nachhinein den passendsten Bildausschnitt aussuchen und zwischen Hoch- oder Querformat wählen konnte.

Es ist somit nicht verwerflich, wenn auch in der digitalen Fotografie der Bildausschnitt erst im Nachhinein durch Beschnitt bestimmt wird.

Die bekannten Leica-Kleinbildfotografen waren wirkliche Künstler, denn sie schränkten sich zu Gunsten der Handlichkeit, in der Möglichkeit das Bild zu beschneiden ein.

Folgenden Artikel, betreffend der Auflösung in der analogen und digitalen Fotografie empfehle ich zu lesen:

<http://www.badenhausen.net/rolf-badenhausen/Pixelmania.htm>

8bit, 12bit, 14bit und 16bit

Profifotografen setzen das Licht derart gut, dass ihre Bilder nur wenig Bearbeitung benötigen und bei Tageslichtaufnahmen wird der richtige Sonnenstand (Jahres- und Tageszeit) abgewartet.

Bei Focus-Stacking im Studio gestaltet sich dies oft sehr aufwendig und selten entstehen Stacks, die nicht bearbeitet werden müssen. Eine gekonnte Bildbearbeitung mit Software ist beim Focus-Stacking ein entscheidender Arbeitsschritt!

Bei der digitalen Studio- und Landschaftsfotografie kann die Lichtgebung unmittelbar nach Anfertigung eines Bildes beurteilt werden, dies jedoch nicht bei Focus-Stacking. Es ist bei Focus-Stacking deshalb dringendst nötig, mit der maximalen Auflösung und maximaler Farbtiefe zu fotografieren und zu stacken, damit man bei der fast immer nötigen Nachbearbeitung mit Software noch den grösstmöglichen Spielraum hat.

Der oft belächelte Pixelwahn hat hier seine volle Berechtigung.

Bilder die im JPG Format angefertigt werden, besitzen immer eine maximale Farbtiefe von 8bit. Das bedeutet, dass vom Schwarz bis zum Weiss 256 Grau- und Farbwerte, also Helligkeitsstufen möglich sind.

Da die Einzelbilder nicht zuverlässig nach der Anfertigung beurteilt werden können, muss etwa um 1 bis 2 Blenden unterbelichtet werden, was unweigerlich eine weitere starke Reduktion der Helligkeitsstufen nach sich zieht. Das gleiche gilt auch bei Anfertigung im 8bit TIF Format.

Wenn in der Kamera die Möglichkeit besteht, die Bilder im 16Bit TIF Format abzuspeichern, dann ist dieses Format ebenfalls gut, jedoch wird sinnlos mehr Speicherplatz als beim RAW Format benötigt. Sinnlos, weil der Fotochip nicht in voller 16bit Farbtiefe aufnimmt, sondern nur im viel Speicherplatz benötigenden 16bit TIF Format abgespeichert wird.

Empfehlenswert ist somit eine Aufzeichnung im 12bit oder noch besser im 14bit RAW Format.

Ob ein Bild mit 8, 12 oder 14Bit Farbtiefe aufgenommen wurde, ist bei der Betrachtung am Monitor oft nicht sichtbar, erkennbar wird es wenn das Bild bearbeitet werden muss und dies ist bei Focus-Stacking meistens der Fall. Da beim Fotografieren nicht der ganze Bereich des Helligkeitsumfanges genutzt wird und somit im JPG Format (8Bit) nicht alle 265 Helligkeitsstufen ausgenutzt werden (bei der Helligkeitsanpassung mit Bearbeitung entstehen Tonwertabrisse), ist zu empfehlen, das RAW Format der Kamera anzuwenden. Das übliche 12Bit Raw Format besitzt 4096 Helligkeitsstufen und das oft auch mögliche 14Bit Format sogar 16384. So bleiben im RAW Format viele Helligkeitsstufen erhalten, auch wenn man nicht den gesamten Helligkeitsbereich der Kamera beim Fotografieren ausnutzt.

Um den vollen Farbumfang beizubehalten ist darauf zu achten, dass die Umwandlung der RAW Bilder in das 16bit TIF Format (65536 Helligkeitsstufen) erfolgt. Ebenso ist es nötig, dass die Focus-Stacking-Software das 16bit TIF Format in seiner vollen Farbtiefe bearbeiten kann.

Bei der ganzen Reihe von Software, die zur Bearbeitung der Bilder benutzt wird, ist ebenfalls darauf zu achten, dass alle das 16bit TIF Format voll unterstützen.

Schärfentiefe

Ist in einem englischen Artikel über die Schärfentiefe die Rede, wird dieser Bereich der Gegenstandsebene, also objektseitig als "depth of field" bezeichnet.

Den Schärfespielraum bei der Bildebene, also Kameraseitig bei der Film- oder Sensorebene, wird im Englischen als "depth of focus" bezeichnet und fälschlicherweise oft als Tiefenschärfe übersetzt.

Diese Fehlübersetzung ist verständlich, denn "depth of focus" kann wörtlich übersetzt Tiefenschärfe heissen.

Bei "depth of focus" handelt es sich aber um einen Fachausdruck, der nicht wörtlich übersetzt werden muss, sondern mit dem in deutscher Sprache passenden Fachausdruck.

Richtigerweise muss "depth of focus" mit "Abbildungstiefe" übersetzt werden.

Diese Fehlübersetzung ins Deutsche findet man selbst in Literatur, die von Kameraherstellern ursprünglich in englischer Sprache verfasst wurde und führt deshalb stark zur Verunsicherung.

Diese Fehlbezeichnung stammt somit nicht vom Hersteller, sondern vom Übersetzer!

Die passende Stackschrittgrösse ermittelt man mit Vergleichsaufnahmen am eigenen Setup! Ihre Grösse wird von der Schärfentiefe beeinflusst.

Zur Schärfentiefe:

Carl Zeiss, Geschäftsbereich Photo-Objektive, März 2010

Schärfentiefe und Bokeh

von H. H. Nasse

www.focus-stacking.ch/A/Bokeh_ZEISS_de.pdf

Seite 20.

"Die allermeisten Tabellen und auch die Berechnungsprogramme, die man im Internet findet, beruhen auf dem geometrischen Modell der Lichtkegel und Zerstreungskreise, die auch wir bisher zur Veranschaulichung benutzt haben. Das ist aber trotz aller Schönheit nur eine Idealisierung der wirklichen optischen Vorgänge in einem Objektiv.

Die üblichen Tabellen und Berechnungshilfsmittel liefern also nicht mehr als Anhaltswerte für die Praxis, aber man sollte sie nicht allzu ernst nehmen."

Will man beim Stacken, die Schritte von Bild zu Bild in ihrer Grösse optimal wählen, begegnet man automatisch der Schärfentiefe eines Objektivs, sie ist ein wichtiger Faktor. Zusätzlich zur Schärfentiefe einer Linse oder eines symmetrischen Linsensystems, kommen bei einem Objektiv noch weitere Faktoren dazu. Ebenfalls kann die Kamera mit ihrem Auflösungsvermögen die Schärfentiefe im resultierenden Bild beeinflussen und es sind auch die mechanischen Eigenschaften des Stack-Schlittens (Macro Rail) zu berücksichtigen und die Betrachtungsdistanz der Bilder. Je nach verwendeter Ausrüstung (Setup) führen diese Faktoren bei der Berechnung zu unterschiedlichen Grössen der idealen Stackschritte. Es ist somit notwendig, dass mit der eigenen Ausrüstung ein Test mit Vergleichsbildern angefertigt wird und dann entsprechend die Grösse der Stackschritte gewählt wird.

Strebt man in der Makrofotografie das Freistellen eines Insekts oder Pflanze an, wird man mit der Schärfentiefe konfrontiert. Schon der Name wirft die Frage auf, ob es Schärfentiefe oder Tiefenschärfe heisst. Vor Jahrzehnten sprach man in der analogen Fotografie von Tiefenschärfe, seit 1970 ist laut "DIN 19040 Blatt 3", die Bezeichnung Schärfentiefe für die gleiche optische Grösse zu verwenden. In den Büchern von John Hedgecoe wird die Bezeichnung immer noch mit "Tiefenschärfe" übersetzt.

Im Bereich der verkleinerten Abbildung der Realität auf der Filmebene oder Sensorebene wird oft eine kleine Schärfentiefe angestrebt (Freistellung), während bei der vergrößernden Projektion auf den Fotosensor sich die Schärfentiefe, bedingt durch optische Eigenschaften, stark verkleinert. Sie wird so gering, dass bei gewölbten Objekten nur noch kleine Bereiche scharf abgebildet werden.

Eine Vergrößerung der Schärfentiefe mittels Abblendens bewirkt zusätzlich eine geringere Auflösung.

Die Schärfentiefe wird durch ihren Nah- und Fernpunkt begrenzt. Diese Punkte sind als solches nicht Orte die sich abheben und klar erkennbar sind, sondern sie sind ein bestimmter Ort im Bereich der sich kontinuierlich verändernden Schärfe. Die Schärfentiefe ist ein subjektiver Eindruck der Schärfenausdehnung.

Nah- und Fernpunkt sind durch das Auflösungsvermögen des Auges bestimmt.

Der Mikroskopiker versteht unter Schärfentiefe den Bereich, bei welchem er trotz abnehmender Auflösung (kleiner als 5%) mit dem Auge noch keinen Verlust an Auflösung wahrnimmt. Er will hauptsächlich die feinsten Strukturen scharf sehen (hohe Auflösung und Kontrast).

Die Schärfentiefe ist für den Mikroskopiker ein Bereich, der über die maximale erkennbare Auflösung verfügt.

Der Fotograf versteht unter Schärfentiefe den Bereich, in welchem die maximale Auflösung noch nicht sichtbar störend abgenommen hat, wenn ein Bild aus einer Distanz von etwa seiner Diagonale betrachtet wird. Nah- und Fernpunkt weisen dabei eine Auflösung auf, die etwa 80-90% der maximalen Auflösung am Punkt der höchsten Auflösung (Fokus) entspricht. Ebenfalls strebt der Fotograf einen möglichst schönen und natürlichen Verlauf der Schärfe in die Unschärfe an.

Bei unterschiedlichem Abbildungsmaßstab sind die für die Schärfentiefe massgebenden Faktoren unterschiedlich stark wirksam.

Bei der verkleinernden Fotografie sind Blende, Abbildungsmaßstab und auch der Betrachtungsabstand mit welchem ein Bild betrachtet wird, in der Berechnung der Schärfentiefe enthalten, während in der Mikroskopie zur Hauptsache die Apertur (Blende) die Schärfentiefe bestimmt.

In der Makrofotografie (DIN-Norm 19040), also im Bereich von 1:10 bis 10:1 ändern sich die massgebenden Faktoren. So ist bei 1:10 der Abbildungsmaßstab für die Berechnung der Schärfentiefe wichtig, verliert zusehends an Wichtigkeit und kann bei 10:1 vernachlässigt werden.

Ebenfalls verliert der Verlauf der Schärfentiefe seine Wichtigkeit, denn bei 10:1 sind wir keinen natürlichen Verlauf der Schärfentiefe gewohnt und stellen somit keinen Anspruch auf Natürlichkeit, sondern eher auf Gefallen.

Die Blende verändert das Verhältnis der Bereiche der Schärfentiefe, vor und hinter der Distanz (maximaler Fokus) der höchsten Auflösung. Wird mit einem 50mm Objektiv auf 5 Meter fokussiert, dann befindet sich bei Blende 16 etwa 3% der Schärfentiefe im Nahbereich vor dem Objekt und 97% im Fernbereich hinter dem Objekt.

Dieses Verhältnis von etwa 1 zu 32, verlagert sich beim Öffnen der Blende in Richtung 1 zu 1.

Bei Blende 5.6 ist das Verhältnis etwa 1 zu 2, der Fernbereich ist doppelt so gross wie der Nahbereich und bei Blende 1.2 ist der Bereich der Schärfentiefe vor und hinter der Distanz der höchsten Auflösung etwa gleich gross.

Bei einem Abbildungsmaßstab von 1:1 und stärkerer Vergrößerung befindet sich der Punkt der höchsten Auflösung in der Mitte des Bereiches der Schärfentiefe, Nah- und Fernbereich stehen im Verhältnis 1 zu 1.

Schärfentiefe in der verkleinernden Fotografie ist somit etwas anderes als die Schärfentiefe in der Mikroskopie.

Der Makrobereich in der Fotografie ist der Übergang zwischen diesen unterschiedlich definierten Schärfentiefen, dies sowohl aus Sicht des Betrachters, als auch von den beteiligten physikalisch optischen Faktoren.

Obwohl die Schärfentiefe mit Formeln auf den Millimeter genau berechnet werden kann, muss man sich bewusst sein, dass diese Berechnungen nur eine grobe Annäherung sind.

Mikroskopiker berechnen die Auflösung anhand der Apertur:

$$LP/mm = 1 / (\lambda / (2NA))$$

Und die Schärfentiefe ebenfalls anhand der Apertur:

$$ST \text{ in mm} = \lambda / (NA * NA)$$

(λ = Lichtwellenlänge in mm, z.B. 0.00055)

Daraus geht hervor, dass Apertur (Blende), Auflösung (LP/mm) und Schärfentiefe einen berechenbaren Zusammenhang besitzen.

Mittels Berechnungen (Theorie) wird eine Auflösung und Schärfentiefe bestimmt, beides sind Grössen in der Praxis.

Arbeitet man mit einem guten Mikroskopobjektiv, werden in der Realität diese berechneten Werte annähernd erreicht.

Arbeitet man als Fotograf im Bereich 1:1 bis 10:1 mit Lupen- oder

Vergrößerungsobjektiven, die in der Bildmitte die errechnete Auflösung nicht erreichen, jedoch einen grösseren Bildkreis besitzen und in den Bildecken höher auflösen als Mikroskopobjektive, dann schwebt man betreffend Schärfentiefe im Ungewissen.

Kann man die reale Auflösung eines Objektes durch ein Objektiv messen, ist es möglich durch Umstellung der Formeln, anhand der gemessenen Auflösung (LP/mm), die Schärfentiefe zu berechnen.

$$ST = \lambda / ((LP/mm * \lambda) * (LP/mm * \lambda) / 4)$$

λ = Lichtwellenlänge in Millimeter, z.B. 0.00055 mm.

Dieser Wert der Schärfentiefe berücksichtigt alle Faktoren, die einen Einfluss auf die Schärfentiefe im Bild besitzen, also auch solche, die uns unbekannt sind. Dies, weil von einer tatsächlich in der Praxis gemessenen Auflösung ausgegangen wird!

Betreffend unterschiedlichem Verhalten im Verlauf der Schärfentiefe bei unterschiedlicher Vergrößerung, kann im Bereich der höchsten Auflösung von einem vergleichbaren Verlauf ausgegangen werden. Unterschiede im Schärfeverlauf zeigen sich vor allem im Bereich ausserhalb der berechneten Schärfentiefe (Kernschärfe).

Sofern man bei einem Setup die Auflösung eines Objektes durch das Objektiv messen kann und einen Stacktisch verwendet, ist es auch möglich, durch Verstellen der Distanz zum Messtarget den Bereich der höchsten Auflösung zu ermitteln. Dies ist aber sehr aufwendig, da die Ermittlung der Auflösungsabweichung in einer Serie von Bildern aufwendiger ist, als die einmalige Ermittlung der maximalen Auflösung mit anschliessender Berechnung.

Da in der Mikroskopie die kritische Blende zur Anwendung kommt, diese hat bereits einen Bezug zum Abbildungsmassstab (ausser bei kostengünstigen und Übersichtsobjektiven mit geringerer Apertur), kann die Schärfentiefe bei Verwendung von Mikroskopobjektiven alleine mittels Lichtwellenlänge und Apertur (Blende) berechnet werden.

Entsprechend ist der berechnete Bereich der Schärfentiefe beim Fotografieren, der Lupen- und Vergrößerungsobjektive im Bereich bis 10:1 verwendet, grösser als bei den Berechnungen des Mikroskopikers mit Mikroskopobjektiven.

Der Unterschied in ihrer Grösse, Schärfentiefe Fotograf / Schärfentiefe Mikroskopiker kann ohne weiteres Faktor 3 und mehr betragen.

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die Situation, wenn man ein Objektiv betreffend Auflösung nicht ausmessen kann:

Für Focus-Stacking sollte man in etwa einen Wert für die Schrittgrösse wissen, der sicher keine unscharfen Bereiche hinterlässt und je nach Anspruch des Fotografen, sogar eine hohe Klarheit der gestackten Bilder ergibt.

In diesem Rahmen ist immer wieder von der Schärfentiefe in der Fotografie und deren Abhängigkeit von vielen Faktoren die Rede. Also nicht der Schärfentiefe von nur einer dünnen Linse, sondern einer Schärfentiefe, die vom ganzen fotografischen Setup abhängig ist und sich nach Erfahrung bei der Betrachtung der Bilder als Anhaltspunkt und Rechengrundlage bewährt hat.

"Kritische Blende", "optimale Blende", "förderliche Blende" und die Beugungsunschärfe sind in der verkleinernden Alltags-Fotografie oft nicht von grosser Bedeutung. Die Blendenöffnung kann je nach gewünschter Schärfentiefe mehr oder weniger geöffnet werden, Aufnahmen mit Blende 1.2 bis 22 sind möglich. Je nach Filmempfindlichkeit und gewünschter Belichtungszeit kann die Blendenöffnung und entsprechend die Belichtungszeit zur richtigen Belichtung verändert werden. Die Auflösung ändert sich nicht so stark wie im vergrößernden Massstab.

In der Makrofotografie rückt die Blende zusätzlich in den Vordergrund, da sie massgeblich an der Höhe der Auflösung beteiligt ist, ihr Spielraum wird enger, Blendenwerte über 11 erleiden einen sichtbaren Auflösungsverlust. "Kritische Blende", "optimale Blende", "förderliche Blende" und die Beugungsunschärfe sind Begriffe, die in der Makrofotografie von hohem Interesse sind. Leider werden sie oft falsch erklärt oder sogar verwechselt. Da ich hier vor allem den Bereich der vergrößernden Fotografie mit Focus-Stacking bespreche, verzichte ich auf die genauere Definition dieser Bezeichnungen und spreche hier nur von der Blende, die für eine möglichst hohe Auflösung sorgt (kritische Blende). Die aus der höchst auflösenden Blendenöffnung resultierende Schärfentiefe wird als gegeben betrachtet und entsprechend werden die Stackschritte gewählt.

Bei einem Abbildungsmassstab von 10:1 oder höherer Vergrößerung ist vorwiegend die Blendenöffnung für die Höhe der Auflösung und der Schärfentiefe verantwortlich.

Im Folgenden berechne ich die Schärfentiefe nach folgender Formel:

Lichtwellenlänge durch (numerische Apertur mal numerische Apertur).

Als Lichtwellenlänge (λ) verwende ich 550nm (grünes Licht).

Die numerische Apertur (NA oder n.A.) findet man manchmal auf Lupenobjektiven und immer auf Mikroskopobjektiven.

Bei der "jüngsten" Generation der ZEISS Luminare findet man z.B. die Gravur "63mm 1:4.5/A0.11". Die Brennweite beträgt 63mm, die maximale Blende ist 4.5 und die entsprechende Apertur ist 0.11. Bei Mikroskopobjektiven findet man z.B. die Gravur 10/0.3, die Vergrößerung ist zehnfach und nach dem Schrägstrich folgt jeweils die numerische Apertur, in diesem Falle beträgt sie 0.3.

Im Bereich 1:1 bis 10:1 verläuft bei Änderung des Abbildungsmassstabes die Schärfentiefe nicht linear.

Beispiel:

ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11

Blendendurchmesser = 63mm / 4.5 = 14mm

Numerische Apertur = $1/(2 \times 4.5) = 1/9 = 0.11$

Zeiss hat die Luminare so bemessen, dass jeweils die offenste Blende die am höchst auflösende ist.

Mikroskopobjektive besitzen nur in den seltensten Fällen eine verstellbare Blende, üblicherweise ist sie fix und bringt so entsprechend der numerischen Apertur ihren Auflösungs Wert.

Wünscht man bei gleicher Vergrößerung eine höhere Auflösung, so wählt man bei Mikroskopobjektiven ein Objektiv mit höherer Apertur (z.B. von 0.25 auf 0.3), die Schärfentiefe wird dadurch geringer. Daraus wird erkennbar, dass die Höhe der Auflösung und Schärfentiefe mit dem Wert der numerischen Apertur verbunden ist.

Für Focus-Stacking-Bilder, die keinen Schärfeverlauf zeigen und somit auch keinen subjektiven Eindruck von einer Schärfentiefe vermitteln, dient die Berechnung der Schärfentiefe der Ermittlung der Grösse der Stackschritte. Somit können bei ihrer Berechnung die subjektiven Faktoren der Schärfentiefe der allgemeinen Fotografie weggelassen werden. Für Focus-Stacking wird nur der am höchsten aufgelöste, kleine Bereich der Schärfentiefe verwendet, die Kernschärfe. Also das Bildformat und der davon abhängige und sich in der Grösse verändernde Unschärfekreis (Schärfe- oder Beugungsscheibchen, Beugungsringe, Airy-Scheibchen), kann ausser Acht gelassen werden (oder als sehr klein angenommen werden, z.B. unter 0.02mm), dies weil sich dieser auch auf den Betrachtungsabstand des Bildes bezieht. Das Verhalten und dessen Wirkung auf den Schärfentiefeeindruck ausserhalb der höchsten Auflösung, kann bei Focus-Stacking ausser Acht gelassen werden.

Dennoch ist im Bereich von 1:1 bis 10:1 die nicht lineare Veränderung der Schärfentiefe für Focus-Stacking und die Berechnung der Stackschrittgrösse von Interesse. In diesem Bereich soll die Berechnung einen gleich hohen gleichmässigen Schärfeeindruck ergeben, wie wenn zwischen 10:1 und 100:1 eine Berechnung nur mit der Lichtwellenlänge und der Apertur angestellt wird. So dass bei gleicher Anzahl von Bildern innerhalb dieser Schärfentiefe ein vergleichbarer Bildeindruck entsteht.

Dies wird erreicht, wenn zwischen 1:1 bis 10:1 mit folgender Formel die Schärfentiefe berechnet wird:

$$2 \cdot u \cdot K \cdot (M+1) / M^2$$

$$u = 0.02$$

K = nominale Blende (die am Objektiv eingestellte Blende)

M = Abbildungs massstab

Einen Rechner für die Ermittlung der Stackschrittgrösse, findet man unter:

www.focus-stacking.com/A/Schaerfentiefe_Kurt_Wirz.xls

Ich verwende folgende Einstellungen:

Anzahl Bilder innerhalb der Schärfentiefe = 3 oder 6, (3 für gute Bilder, 6 für sehr klare Bilder).

Im Bereich von 10:1 bis 100:1 mit Mikroskopobjektiven berechne ich die Schärfentiefe mit:

Lichtwellenlänge / (numerische Apertur x numerische Apertur)

$$\lambda / (NA \times NA)$$

Als Lichtwellenlänge verwende ich die Wellenlänge des grünen Lichtes, sie beträgt etwa 0.00055 mm.

Für das Mikroskopobjektiv NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17, es besitzt eine

Apertur von 0.3, rechnet sich:

$$0.00055\text{mm} / (0.3 \times 0.3) = 0.00055\text{mm} / 0.09 = 0.0061\text{mm}$$

Auch hier verwende ich folgende Einstellungen:

Anzahl Bilder innerhalb der Schärfentiefe = 3 oder 6, (3 für gute Bilder, 6 für sehr klare Bilder).

Bei drei Bildern innerhalb der Schärfentiefe ergibt sich eine Stackschrittgröße von $0.0061\text{mm} / 3 = 0.002\text{mm}$.

Die Lochkamera, Camera obscura:

Eine Lochkamera besitzt an Stelle einer Linse ein kleines Loch, der Durchmesser ist oft kleiner als 1mm.

Die Schärfentiefe ist fast unendlich, das Bild ist frei von Verzeichnungen, chromatischer Aberration (CA), frei von Astigmatismus, Koma, sphärischer Aberration und Bildfeldwölbung, besitzt aber eine geringe Auflösung, eine Vignettierung und es benötigt sehr viel Licht und eine lange Belichtungszeit um ein Bild aufzunehmen.

Wird an Stelle des kleinen Loches eine grössere Linse oder Objektiv eingesetzt, wird das projizierte Bild heller, es kann somit kürzer belichtet werden, die Auflösung steigert sich, besitzt aber eine geringere Schärfentiefe und ist von Abbildungsfehlern gezeichnet.

Geringe Schärfentiefe und Abbildungsfehler sind somit durch Linsen bedingt.

Lochkameras und Zubehör:

- Löcher für das digitale Kleinbildformat findet man unter dem Suchbegriff "Lochblende pinhole".

- Das Objektiv Thingyfy Pinhole Pro für Kleinbildkameras ist auch mit variabler Blendenöffnung von 0.1mm bis 0.8mm erhältlich.

<https://thingyfy.com/story-lens/>

Analoge Lochkameras und deren Bilder findet man hier:

<https://realitysosubtle.fr/>

Kameras im Format 6x6cm

<https://realitysosubtle.fr/custom-cameras/realitysosubtle-6x6/>

Iford Obscura Lochkamera 4x5inch

<https://www.pc-magazin.de/news/ilford-obscura-lochkamera-fotografie-pur-1526044.html>

Schärfentiefe bei Verwendung von Zwischenringen und Balgen

Je grösser die Distanz zwischen Objektiv und Bildebene, umso grösser wird das Bild. Dies kann bei Foto-, Lupen- und Mikroskopobjektiven mit Zwischenringen und Balgen erreicht werden.

1:1 bis 4:1 mit AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D.

Ist das Objektiv direkt an der Kamera angeschlossen, erreicht man maximal einen Abbildungsmassstab von 1:1 und je nach Berechnungsweise eine Schärfentiefe von 1.1mm (Blende 8), bei einer Auflösung des Objektes von etwa 100LP/mm (Linienpaare pro Millimeter).

Bei 2:1 mit Zwischenringen oder Balgen beträgt die Schärfentiefe (Blende 8) etwa 0.4mm. Anstelle von Blende 8 erreicht man mit Blende 5.6 eine höhere Auflösung (200LP/mm) mit einer Schärfentiefe von 0.28mm.

Bei 4:1 und Blende 8 beträgt die Schärfentiefe 0.17mm.

Blende 4 ist die "Kritische Blende", die am höchsten mit etwa 300LP/mm auflöst.

Die Schärfentiefe beträgt dann etwa 0.08mm.

Ersichtlich wird, dass bei der Berechnung der Schärfentiefe nicht nur der Abbildungsmassstab (1:1 bis 4:1 und weiter) die Schärfentiefe verringert, sondern es muss ebenfalls für eine maximale Auflösung die Blende geöffnet werden, was zusätzlich für eine geringere Schärfentiefe sorgt.

5:1 bis 10:1 mit ZEISS Luminar 25mm bei Blende 3.5.

Lupenobjektive werden mit Zwischenringen oder Balgen an der Kamera angeschlossen.

Die Veränderung der Schärfentiefe von 5:1 auf 10:1 beträgt etwa 50% und die Auflösung steigert sich von 430LP/mm auf 480LP/mm, etwa 11%.

- Die Blendenzahl ergibt sich aus dem Verhältnis von Brennweite zur Öffnungsweite.

Beispiel:

Bei einem 100mm Fotoobjektiv hat die Blendenöffnung bei Blendenzahl 8 einen Durchmesser von $100\text{mm}/8 = 12.5\text{mm}$.

- Apertur (NA) = $1 / (\text{Blendenzahl} + \text{Blendenzahl})$.

Beispiel:

Mit Blende 3.5, beträgt die Apertur = $1 / (3.5 + 3.5) = 1 / 7 = 0.143$

- Schärfentiefe = λ (Wellenlänge im Millimeter bei grünem Licht) / (NA x NA)

Beispiel:

Mit Apertur 0.143: Schärfentiefe (mm) = $0.00055 / (0.143 \times 0.143) = 0.027\text{mm}$.

10:1 bis 20:1 mit NIKON M Plan 10/0.25, 210/0

Mikroskopobjektive werden mit Zwischenringen oder Balgen an der Kamera angeschlossen. Das exakte Einhalten der optischen Tubuslänge (Mechanische Tubuslänge auf Objektiv eingraviert, minus 10mm ergibt die optische Tubuslänge) ist zu empfehlen, man erhält dadurch die Nennvergrößerung.

Wird die Tubuslänge erhöht, so erhöht sich auch die Vergrößerung.

Das NIKON M Plan 10/0.25, 210/0 besitzt eine Schärfentiefe von 0.008mm.

Folgendermassen, nur über die Blende (Apertur) berechnet.

Schärfentiefe = λ (Wellenlänge im Millimeter bei grünem Licht) / (NA x NA).

Apertur 0.25: Schärfentiefe (mm) = $0.00055 / (0.25 \times 0.25) = 0.0088\text{mm}$.

Verlängert man den Tubus, so dass eine Abbildung von 20:1 erreicht wird, beträgt die Schärfentiefe etwa 0.0078mm und ist somit nur minimal kleiner.

Da sich die Auflösung kaum erhöht, macht es keinen Sinn bei Mikroskopobjektiven die Tubuslänge zu erhöhen.

Bei der Bestimmung der Stackschritte ist somit die Berechnung über die Apertur (Blende) angebracht.

10:1 bis 100:1 mit Mikroskopobjektiv

Die Schärfentiefe wird vorwiegend von der Apertur bestimmt!

Berechnet wird sie:

Schärfentiefe = λ (Wellenlänge im Millimeter bei grünem Licht) / (NA x NA).

Beispiel mit Apertur 0.25: Schärfentiefe (mm) = $0.00055 / (0.25 \times 0.25) = 0.0088\text{mm}$.

Allgemein gilt:

Beim Schliessen der Blende um 2 volle Blendenwerte (z.B. von 2.8 auf 5.6) steigt die Schärfentiefe auf das Doppelte.

Bei doppeltem Abbildungsmaßstab (z.B. von 2:1 auf 4:1) sinkt die Schärfentiefe auf die Hälfte.

Einen Rechner für die Ermittlung der Stackschrittgröße, findet man unter:

www.focus-stacking.com/A/Schaerftiefe_Kurt_Wirz.xls

Ich verwende folgende Einstellungen:

Anzahl Bilder in ST = 3 oder 6, (3 für gute Bilder, 6 für sehr klare Bilder).

Um Klarheit in diese Zusammenhänge zu bekommen und schlussendlich zu wissen, wie gross nun die Stackschritte sein müssen, empfehle ich Vergleichsaufnahmen anzufertigen. Man stellt eine Serie mit extrem kleinen Stackschritten her. Stackt dann mit der Software alle Bilder, dann jedes zweite Bild, jedes dritte Bild usw.. Die resultierenden Bilder werden nach Gutdünken bearbeitet und erst dann miteinander verglichen. Erst nach der Bearbeitung (Schärfen usw.) werden die Unterschiede klar sichtbar. Anhand dieser Bilder kann dann bestimmt werden, wie viele Bilder innerhalb der Schärfentiefe nötig sind. Geht man auf diese Weise vor, erhält man Ergebnisse die real sind und somit für das entsprechende Objektiv und Setup relevant sind. Das ist dann die Wahrheit, auch wenn sie anders klingt als die Ergebnisse von Berechnungen!

Schärfe, Auflösung

Die nicht direkt messbare Schärfe ist ein Bildeindruck, der durch mehrere messbare Faktoren entsteht. Sie ist das Produkt von Auflösung (LP/mm), Kontrast (MTF) und weiterer Faktoren.

Erklärung verwendeter Abkürzungen:

LP/mm, Linienpaare pro Millimeter, bezieht sich auf das Auflösungsvermögen eines Objektivs.

LP/BB, Linienpaare in der Bildbreite, bezieht sich auf das Auflösungsvermögen des Fotochips in der Bildbreite.

LP/BH, Linienpaare in der Bildhöhe, bezieht sich auf das Auflösungsvermögen des Fotochips in der Bildhöhe.

Schärfe ist ein subjektiver Eindruck, der bei der Betrachtung entsteht.

Schärfe ist das Produkt mehrerer Faktoren und kann nicht direkt gemessen werden.

Die hauptsächlichsten Faktoren die zum Schärfeeindruck führen, sind die Auflösung und der Kontrast.

Die Auflösung wird anhand eines Zebromusters, also Linien in Abfolge von Schwarz und Weiss gemessen. Sie wird in "Anzahl Linienpaare pro Millimeter (LP/mm)" angegeben, bei welcher der Helligkeitsunterschied noch 10% beträgt (MTF10). Je schmaler die schwarzweissen Streifen sind, umso weniger sauber werden sie abgebildet, bis zur gleichmässigen Verwischung in einem Grau.

Die Modulationsübertragungsfunktion (Modulation Transfer Function, MTF) beschreibt das Verhältnis des Detailkontrasts an Kanten eines Objektes zu dessen bildlichen Darstellung. Je schneller und grösser der Helligkeitsübergang bei der Abbildung stattfindet, je weniger Pixel für diesen Übergang benötigt werden, umso schärfer ist der Bildeindruck.

Die Kontrastfähigkeit einer Optik sinkt, je kleiner die Details werden.

Die MTF unterscheidet sich dadurch klar zum Kontrastumfang eines Bildes und darf deshalb mit diesem nicht verwechselt werden.

Für den Schärfeeindruck eines Bildes ist in erster Linie entscheidend, wie schnell, wie sauber und wie stark der Helligkeitsverlauf von Schwarz zu Weiss an Kanten stattfindet (MTF). Des Weiteren trägt der gesamte Kontrastumfang (LW) eines Bildes zum Schärfeeindruck bei und ebenfalls die Auflösung (LP/mm).

Der gesamte Bildkontrast wird anhand von Helligkeitsunterschieden in Lichtwerten (LW) gemessen. Er gibt an, wie weit der hellste Punkt vom dunkelsten Punkt im Bild in der Helligkeit entfernt ist. Bei einem LW von 1 ist die Helligkeit (Lumen) am hellen Ort doppelt so hoch wie beim verglichenen dunkleren Ort, also im Verhältnis 2:1. Ist das Verhältnis der Helligkeit 4:1 dann ist der LW = 2. Das Verhältnis 8:1 entspricht einem LW von 3.

Bei 256:1 entspricht dies einem LW = 8.

Die Verdoppelung des Wertes der Helligkeit (Lumen) entspricht einem LW.

In der Fotografie spricht man beim Kontrastumfang (LW) von der Dynamik und gibt ihn mit Blendenwerten an (Blendenstufen = Lichtwert). Optimal in der Fotografie sind 10 Blendenstufen die eine digitale Kamera wiedergeben kann, dies entspricht einem Helligkeitsumfang von 1024:1.

Heutige Digitalkameras (2015) können einen Dynamikumfang von gut 10 Lichtwertstufen (LW) reproduzieren. Das stellt zwar einen grossen Fortschritt gegenüber einem Diafilm dar, der nur eine Dynamik von ca. 6 LW besitzt, bleibt aber noch weit hinter den

Fähigkeiten des menschlichen Auges zurück. Das kann nämlich bereits ohne Adaption einen Kontrastunterschied von ca. 14 LW verarbeiten.

Diese drei Faktoren (Auflösung, Detailkontrast MTF und Bildkontrast LW) sind eng miteinander verknüpft. Die Stärke eines einzelnen Faktors kann geringer sein, was mit der Anhebung eines anderen ausgeglichen werden kann, so dass für den Betrachter in etwa der gleiche Schärfeeindruck bestehen bleibt.

Es ist also möglich, dass ein Bild durch einen hohen Kontrast einen scharfen Eindruck macht, obwohl es an Details mangelt.

Bei der Betrachtung am Mikroskop ist nicht nur eine hohe Auflösung gewünscht (ab einer gewissen Auflösung ist das Auflösungsvermögen des Auges limitierend), sondern der Kontrast soll ebenfalls hoch sein, so dass die feinen Kanten der Details auch mit blossen Auge klar erkannt werden. Auf diese Situation sind die Mikroskopobjektive optimiert, sie zeichnen eher kontrasthart. Ein hoher Kontrast lässt die Details, die das Auge noch auflösen kann, als scharf erkennen, kleinste Details werden somit gut erkannt. Fortschritte brachten die ab etwa 1975 deutlich verbesserten Antireflexschichten, die Farbbrillanz und -sättigung und auch die Kontrastwiedergabe der Mikroskopobjektive erhöhten.

In der digitalen Fotografie ist vor allem eine hohe Auflösung wichtig, denn sie kann nicht nachträglich beliebig mit Bearbeitung erhöht werden, jedoch kann mit Bearbeitung selektiv die Farbbrillanz und -sättigung und der Kontrast der feinen Kanten verstärkt werden. In der Fotografie dient eine sanfte Abstufung von Helligkeits- und Farbwerten dem natürlichen Eindruck eines Bildes. Eine diffuse Beleuchtung wirkt der harten Kontrastübertragung der Mikroskopobjektive entgegen, ohne dass die Auflösung reduziert wird.

Eine Fotografie kann in einem gewissen Bereich vergrössert werden, so dass bei gleichem Objektiv auch kleinere Details, die am schlecht abgestimmten Mikroskop vom blossen Auge nicht mehr erkannt werden, gut sichtbar werden.

In der Fotografie ist eine gleichmässige Schärfe bis in die Bildecken erwünscht, während sie bei der Mikroskopie, vor allem in der Bildmitte, so hoch wie möglich sein soll.

Ich empfehle deshalb im Bereich eines Abbildungsmassstabes bis zu 10:1 Foto- oder Lupenobjektive zu verwenden, da diese speziell für die Fotografie entwickelt wurden und deshalb feiner und naturgetreuer bis in die Bildecken zeichnen.

Werden runde Objekte formatfüllend fotografiert, befindet sich der mit hoher Auflösung gewünschte Bereich vorwiegend im mittleren Bildbereich und am Bildrand. Ist vor allem Hintergrund zu sehen, dann kann im Interesse einer maximalen Auflösung, vor allem in der Bildmitte, ein Mikroskopobjektiv von Vorteil sein.

Natürlich gibt es betreffend Auflösung bei Objektiven einen Unterschied zwischen guten und schlechten Objektiven. Jedoch ist die maximale Auflösung (LP/mm) zur Hauptsache von der Grösse der Blende (Apertur) abhängig!

Die Auflösung lässt sich rechnerisch ermitteln:

Auflösung in LP/mm = $1 / (\text{Wellenlänge} / (2 \times \text{NA}))$

oder vereinfacht: $\text{NA} \times 3600$

NA - Blende - LP/mm

0.10 - 5.00 - 360

0.15 - 3.33 - 540

0.20 - 2.50 - 720

0.25 - 2.00 - 900

0.30 - 1.67 - 1080

0.40 - 1.25 - 1440

0.50 - 1.00 - 1800

0.60 - 0.83 - 2160

0.70 - 0.71 - 2520

0.80 - 0.63 - 2880

0.90 - 0.56 - 3240

Der oft belächelte Pixelwahn macht Sinn!

Wenn ein Objektiv eine Grenzauflösung von z.B. 1600 LP/BH (BH = Bildhöhe) besitzt, dann bedeutet dies, dass ein Zebromuster das mit weniger als 10% Helligkeitsunterschied abgebildet wird, nicht mehr im Bereich des Messwertes enthalten ist.

Die Auflösungsgrenze ist nicht abrupt, da das Objektiv analog ist und die Auflösungskurve kontinuierlich absinkt und dies bei 10% Kontrast oft nicht sehr steil. Die 5% Kontrastmarke kann bei einer Auflösung die 5-10% höher ist, erreicht werden, das wären in unserem Falle bei etwa 1760LP/BH. Bietet die Kamera eine höhere Auflösung als das Objektiv, dann kann mit der Bildbearbeitung der Bereich unter 10% Kontrast herausgearbeitet und somit sichtbar gemacht werden. Es ist also sinnvoll, wenn die Kamera höher auflöst als die Messdaten der Optik lauten.

Das Rauschen einer Kamera äussert sich dadurch, dass einzelne Pixel einen gut erkennbaren anderen Farbwert besitzen als die Nachbapixel, das Rauschen findet somit auf Pixelebene statt. Je kleiner das Pixelrauschen, also die Grösse der Pixel im Verhältnis zur kleinsten optischen Bildinformation ist, umso leichter lässt sich somit das Rauschen entfernen.

Das Auflösungsvermögen (LP/mm) einer Kamera mit Objektiv sagt nicht aus, wie sauber und somit ohne Artefakte die Kamera die Details darstellt.

Vergleicht man Bilder die mit einer Kamera angefertigt wurden, die die gleiche Auflösung besitzt wie die technischen Daten der Auflösung des Objektivs, mit Bildern einer Kamera die drei Mal oder höher auflöst als die technischen Daten des Objektivs lauten, dann erkennt man bei der Betrachtung der Bilder, dass die dreifache Auflösung einen gut erkennbaren klareren und schärferen Bildeindruck hinterlässt. Ab der fünffachen Auflösung der Kamera erkennt man keinen Unterschied im Bildeindruck mehr.

So verhält es sich auch bei der Grösse der Stackschritte. Mit drei Bildern innerhalb der Schärfentiefe (die mit der Blende berechnet wird) erhält man Bilder, die die maximale Auflösung durchgehend zeigen. Verkleinert man die Stackschritte auf sechs Bilder innerhalb der Schärfentiefe, gewinnt das resultierende, gestackte Bild nicht an mehr Auflösung (LP/mm), sondern an Klarheit und Schärfeeindruck.

Kombiniert man bei der Herstellung der Bilder eine extrem hochauflösende Kamera mit extrem kleinen Stackschritten, erhält man gut erkennbar extrem klare, hoch und sauber aufgelöste Bilder.

Ebenfalls ist eine Retusche bei höher aufgelösten Bildern einfacher, sie kann gezielter und mit weniger Artefakten ausgeführt werden. Zeichnet man die Bilder im RAW Format mit

einer maximalen Farbtiefe auf, können die Tonwerte ohne die schnelle Entstehung von Tonwertabrissen bearbeitet werden.

Um zu verstehen was Auflösung ist und wie sie sich beim Abbilden mit optischen Geräten auswirkt, sollte man folgenden einfachen Versuch ausführen.

Dazu wird ein gemaltes oder hoch aufgelöstes Bild oder ein analoges Farbfoto, in etwa A4 Format benötigt.

Es wird mit einem Farbkopierer in bestmöglicher Qualität kopiert.

Diese Kopie besitzt dann die maximale Auflösung, die der verwendete digitale Fotokopierer leisten kann.

Nehmen wir nun an, dass dies der maximalen Leistung einer Kamera mit Objektiv entspricht und kopieren nun dieses Blatt mit der gleichen Abbildungsqualität, also gleich hoher Auflösung des kopierenden Gerätes und vergleichen nun diese Kopien, dann fällt neben diversen Farbunterschieden auf, dass die zweite Kopie weniger hoch aufgelöst ist, obwohl sie mit derselben Auflösung des Kopiergerätes kopiert wurde!

Daraus kann man schliessen, dass ein Objektiv, das ein Bild mit einer Auflösung von z.B. maximal 1000LP/mm auf den Foto-Chip projiziert, auch dann wenn die Kamera 1000LP/mm auflösen kann, das Bild niemals 1000LP/mm besitzt.

In einem Vergleich verwendete ich eine Strichvorlage auf Fotopapier "Microcopy Resolution Test Chart, National Bureau of Standards-1963-A." Die kleinste Auflösung beträgt 18LP/mm, die Kopie mit dem Fotokopierer besass eine Auflösung von 11LP/mm. Dies sagt aus, dass der Kopierer eine maximale Auflösung von 11LP/mm besitzt. Fertigt man nun eine Kopie der Kopie mit dem gleichen Gerät an, besitzt diese Kopie nur noch eine Auflösung von 7.1LP/mm also nur noch 64.5%. Es ist also eine Reduzierung der Auflösung von 35.5% aufgetreten, obwohl der Kopierer ja eigentlich 11LP/mm auflösen kann! Auch bei weiteren Kopien ergibt sich wiederum eine Reduktion der Auflösung um 25% und weiter um 20%, dann um 15% usw.

Ein weiterer wichtiger Faktor hat mit der Ermittlung der Werte zu tun.

Ein Objektiv ist immer analog und besitzt somit keine eigentliche klar erkennbare abrupte Auflösungsgrenze. Damit Objektive vergleichbar sind, hat man sich geeinigt, dass die höchste Auflösung bei Messwerten dann erreicht ist, wenn bei einem Zebromuster (Schwarzweisse Striche) der Helligkeitsunterschied zwischen Schwarz und Weiss auf 10% des maximalen Unterschiedes der Helligkeit abgesunken ist. Bei analogen Bauteilen heisst dies nicht, dass unterhalb dieser 10% nichts mehr übertragen wird! Das Objektiv löst somit auch noch kleinere Unterschiede auf, auch solche die sich nur mit z.B. 5% in der Helligkeit unterscheiden. Die digitale Bildbearbeitung kann gezielt solche feinen Details verstärken. Da sich auch ein Helligkeitsunterschied von 2% noch herausarbeiten lässt, muss ein digitales Bildaufzeichnungsgerät eine weit höhere Auflösung verarbeiten können, als die Messwerte des analogen Objektivs lauten, um das Maximum an Auflösung der optischen Kette zu erhalten.

Eine digitale Kopie einer Datei im Computer ist immer mit dem Original absolut identisch. Sobald aber am Anfang einer Kopierkette ein analoges Glied steht und somit eine Analog-Digital-Umwandlung stattfindet, ist mit Verlusten zu rechnen. Die Befürchtung, dass die Auflösung einer 36MPixel Kamera die Auflösung von guten Objektiven sinnlos überschreitet, ist eine Irrmeinung, die auf zu wenig Wissen um die Art der Erfassung der analogen Messwerte beruht oder das Auge ist noch zu wenig geschult. Ebenfalls ist die Grösse und die Qualität des Ausdruckes zu berücksichtigen, wobei höher aufgelöste Bilder, auch bei Reduzierung der Auflösung klarer erscheinen, als wenn mit niedrigerer Auflösung fotografiert wurde.

Nach meinen bisherigen Beobachtungen und Messungen schliesse ich, dass eine digitale Kamera mindestens 2 Mal so hoch auflösen sollte, wie die Messwerte der Grenzauflösung eines Objektivs lauten.

In etwa ähnlich wie bei Tonaufzeichnungen, wo eine obere Frequenz von 20kHz mit einer Samplingfrequenz (Mess- und Aufzeichnungsfrequenz) von 44.1Khz aufgezeichnet wird.

All die erwähnten Berechnungen der Schärfentiefe beruhen auf einer idealen dünnen Linse. In der Fotografie werden aber Linsenkombinationen verwendet (Objektiv), die sich unterschiedlich stark den theoretischen Werten nähern, aber nie exakt stimmen. In Bereich der Mikroskopie (vergrößernder Abbildungsmaßstab) kann von der Apertur des Objektivs die Auflösung berechnet werden. Dies bedeutet, dass von einer gemessenen Auflösung im Bild die "wirksame Apertur" berechnet werden kann und aus dieser berechneten "wirksamen Apertur" die Schärfentiefe im Bild.

Die so berechnete Schärfentiefe bezieht sich dann nicht nur auf rein theoretische optische Werte, sondern es wird von der im Bild gemessenen Auflösung die Schärfentiefe berechnet, was automatisch auch das Auflösungsvermögen der Kamera beinhaltet.

Auflösung und Vergrößerung

Erklärung verwendeter Abkürzungen:

LP/mm, Linienpaare pro Millimeter, bezieht sich auf das Auflösungsvermögen eines Objektivs.

LP/BB, Linienpaare in der Bildbreite, bezieht sich auf das Auflösungsvermögen des Fotochips in der Bildbreite.

LP/BH, Linienpaare in der Bildhöhe, bezieht sich auf das Auflösungsvermögen des Fotochips in der Bildhöhe.

Ein Mikroskopiker möchte zur Information winzig kleine Teile gut aufgelöst sehen. Ein Fotograf der im Bereich der vergrößernden Fotografie arbeitet, möchte ein Bild anfertigen, das zusätzlich einen möglichst grossen Bildausschnitt mit einer guten Auflösung bis in die Bildecken zeigt, also viel Bildinhalt. Betrachtet man die Bildinformation in LP/mm, das sind aufgelöste Linienpaare auf die Bildfläche und rechnet diese in einzelne Pixel um, dann fällt auf: je mehr vergrössert wird, umso weniger gut aufgelöster Inhalt besitzt ein Bild.

Bei einem Bildverhältnis (Breite durch Höhe) von 1.5 ergeben sich bei optimal gewählten Objektiven und unterschiedlichem Abbildungsmassstab die folgenden maximalen Megapixel eines Bildes.

Folgende Werte gelten entsprechend dem grossen Bildkreis der Objektiv für Bilder, die mit einer Vollformatkamera (Chip = 36 mm x 24 mm) angefertigt werden.

1:1 (102 LP/mm) = 7360 x 4907 Bildpunkte

= 36 MegaPixel AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D

2:1 (210 LP/mm) = 7540 x 5027 = 38 MP Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13

3:1 (270 LP/mm) = 6460 x 4306 = 27.8MP Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13

4:1 (320 LP/mm) = 5744 x 3830 = 22MP Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13

5:1 (420 LP/mm) = 6030 x 4020 = 24MP Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15

6:1 (450 LP/mm) = 5385 x 3590 = 19.3MP Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15

7:1 (460 LP/mm) = 4718 x 3145 = 14.8MP Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15

8:1 (470 LP/mm) = 4218 x 2812 = 11.9MP Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15

9:1 (665 LP/mm) = 5305 x 3537 = 18,7MP Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2

10:1 (680 LP/mm) = 4882 x 3254 = 16MP Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2

Folgende Objektiv sind Mikroskopobjektiv, die ein etwas kleineren Bildkreis besitzen und deshalb für eine Crop-Kamera (Faktor 1.5 oder 2.0) geeignet sind.

Vollformat-Kameras sind für Mikroskopobjektiv nicht geeignet, die Bildqualität ist in den Bildecken sehr mangelhaft, das Bild muss eventuell beschnitten werden.

Folgende Werte gelten entsprechend dem kleinen Bildkreis der Mikroskopobjektiv, für Bilder die mit einer Crop-Kamera (Faktor 1.5, Chip 23.5 mm x 15.6 mm) angefertigt werden.

10:1 (1050 LP/mm) = 4935 x 3290 = 16.2MP NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17

20:1 (1250 LP/mm) = 2938 x 1958 = 5.6MP NIKON M Plan 20/0.4 LWD, 210/0

40:1 (1800 LP/mm) = 2115 x 1410 = 3.0MP NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0

60:1 (2400 LP/mm) = 1880 x 1253 = 2.4MP NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0

100:1 (2800 LP/mm) = 1316 x 877 = 1.2MP NIKON M Plan, 100/0.8 ELWD, 210/0

Bei 2:1 besteht ein voll aufgelöstes Bild aus 38 Megapixeln, während es bei 100:1 nur noch maximal 1.2 voll aufgelöste Megapixel besitzen kann.

Somit verkleinert sich die Vielfalt an Details im Bild für den Fotografen bei stärkerer Vergrößerung stark. Eine möglichst starke Vergrößerung ist für den Fotografen somit nicht unbedingt dienlich.

Dies ist deutlich zu erkennen, wenn man das NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0, das eine Auflösung von 2400LP/mm besitzt, mit dem NIKON M Plan, 100/0.8 ELWD, 210/0, das eine Auflösung von 2800 LP/mm besitzt, vergleicht.

Das 100/0.8 Objektiv besitzt eine um nur 16% höhere Auflösung als das 60/0.7, dies bei einem Bildinhalt, der in der Anzahl nur noch etwa halb so viele Information zeigt und eine Auflösungssteigerung um 16% ist nicht viel. Das ist nicht unbedingt im Sinne des Fotografen!

Möchte man bei Mikroskopobjektiven die beste Abbildungsqualität, dann sollte man sie exakt nach ihrer Spezifikation, also mit ihrer Nennvergrößerung verwenden. Bei den Luminar Lupenobjektiven von Zeiss ist man im Abbildungsmaßstab flexibler, doch auch da gibt es eine sinnvolle Grenze und sollte sie deshalb nicht bei sinnlos hohem Abbildungsmaßstab einsetzen.

Als Beispiel nenne ich hier, wie es sich beim ZEISS Luminar 25mm an einer Nikon D810 verhält:

Abbildungsmaßstab / Auflösung Bildmitte (LP/mm) / Auflösung Bildecken (LP/mm) / Prozent der maximalen Auflösung in den Bildecken / Anzahl aufgelöster Pixel im Bild.

5:1 / 430 / 360 / 83.7 / 24MP
 6:1 / 450 / 400 / 88.9 / 19.3MP
 7:1 / 460 / 430 / 93.5 / 14.8MP
 8:1 / 470 / 470 / 100 / 11.9MP
 9:1 / 475 / 475 / 100 / 9.6MP
 10:1 / 480 / 480 / 100 / 7.9MP

Stellt man beim Luminar 25 mm den Anspruch, dass in den Ecken die gleich hohe Auflösung erreicht wird wie in der Bildmitte, also 100%, dann macht es Sinn, das Luminar 25mm maximal bei einem Abbildungsmaßstab von 8:1 zu verwenden. Bei 10:1 besitzt es eine Auflösungssteigerung von 2.1%, dies sieht man im Bild nicht, jedoch sinkt der gesamte Bildinhalt von 11.9MP auf 7.9MP, das sind bei 10:1 nur noch 66% des Bildinhaltes von 8:1.

Es ist an einer Nikon D810 also nicht angebracht, das Luminar 25mm mit einem Abbildungsmaßstab der höher ist als 8:1 zu verwenden!

Auch hier wird klar ersichtlich, dass die richtige Verwendung (Abbildungsmaßstab) eines Objektivs für ein Maximum an Bildinformation sorgt und nicht die maximal machbare Vergrößerung anzustreben ist.

So steigt die Auflösung z.B. nur um etwa 30% wenn die Vergrößerung verdoppelt und dadurch der Bildausschnitt halbiert wird!

Der Fotograf muss sich also bewusst sein, was er will. Wünscht er kleinste Details zu zeigen, dann setzt er das Objektiv bei 8:1 ein, wünscht er ein Bild mit möglichst vielen Details, dann wählt er mit dem ZEISS Luminar 25mm einen Abbildungsmaßstab von 5:1 oder er wählt bewusst einen Mittelweg.

Beim ZEISS Luminar 25mm ist die untere Grenze des Abbildungsmaßstabes dadurch begrenzt, dass bei 4:1 schon eine leichte Abschattung in den Ecken sichtbar wird und die Auflösung zu den Ecken stark abfällt.

Bei Mikroskopobjektiven ist der eingravierte Vergrößerungsfaktor exakt einzuhalten, da jede Abweichung die Bildqualität verschlechtert.

Für den Bereich von 1:1 bis 10:1 sind ebenfalls Mikroskopobjektive erhältlich.

Diese bilden in der Bildmitte etwas höher als Foto- oder Lupenobjektive ab, jedoch fällt ihre Auflösung zum Bildrand (Ecken) sichtbar ab. Ein weiterer Nachteil bei

Mikroskopobjektiven in diesem Bereich ist, dass ihre Vergrößerung nicht flexibel ist und somit eine optimale Bildausschnittanpassung nicht immer möglich ist.

Foto-Objektive sind für einen weiten Bereich des Abbildungsmaßstabes optimiert, Mikroskopobjektive sind für einen bestimmten Abbildungsmaßstab optimiert und erreichen deshalb bei ihrer Nennvergrößerung, vorwiegend in der Bildmitte, eine höhere Abbildungsleistung als ein Foto-Objektiv.

Bei Vollformat muss, im Vergleich zu einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5, für den gleichen Bildausschnitt optisch 1.5 mal stärker vergrößert werden, dies bringt automatisch eine höhere Auflösung. Das Objekt ist mit der Vollformat Kamera somit höher aufgelöst als mit einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5!

Bei Verwendung einer Vollformatkamera ist darauf zu achten, dass der Bildkreis des Foto-, Lupen- oder Vergrößerungsobjektivs genügend gross ist.

Fotografiert man ein Objekt, das nicht bis in die Bildecken höchst aufgelöst sein muss, z.B. einen Fliegenkopf der kreisförmig ist und somit eine verminderte Auflösung am Bildrand und in den Ecken nicht nachteilig ist, dann kann die Anwendung eines Mikroskopobjektivs z.B. bei 5:1 gegenüber einem Lupen- oder Vergrößerungsobjektivs bessere Resultate verzeichnen.

Es ist also immer auch die Ausdehnung und Lage des Objektes mit seinem bildwichtigsten Teil im Bild zu berücksichtigen und entsprechend der Objekttyp und das Objektiv zu wählen.

Anzahl und Grösse der Stackschritte

In der Mikroskopie berechnet man die Schärfentiefe anhand der Lichtwellenlänge und der Apertur. Bei Verwendung von Mikroskopobjektiven im Bereich eines Abbildungsmassstabes von 10:1 bis 100:1, gilt:

$$\lambda / (NA \times NA)$$

λ = ist die Lichtwellenlänge (0.00055mm).

Apertur / Schärfentiefe in mm

0.25 / 0.0088

0.3 / 0.0061

0.4 / 0.0034

0.5 / 0.0022

0.7 / 0.0011

Für Bilder im Internet reichen 1-2 Bilder innerhalb der berechneten Schärfentiefe, es sind keine vom Auge erkennbare Bereiche von Unschärfe vorhanden.

Verwendet man 3 Bilder innerhalb der Schärfentiefe, können die Bilder stark vergrössert werden, ohne dass bei naher Betrachtung die Klarheit geringer ist.

Verwendet man 6 Bilder innerhalb der Schärfentiefe, werden die Bilder klarer (schärfer), da hier die Stacking-Software nur den absolut höchst aufgelösten Bereich (Kernschärfe) der Einzelbilder verwendet.

Zerene Stacker verarbeitet 6 Bilder innerhalb der Schärfentiefe sehr gut.

Im Bereich eines Abbildungsmassstabes von 1:1 bis 10:1 mit Foto-, Lupen- oder Vergrösserungsobjektiven, ändert sich die Grösse der Schärfentiefe nicht linear mit der Veränderung des Abbildungsmassstabes. Es ist deshalb für Focus-Stacking, folgende Formel anzuwenden:

$$2 u K (M+1)/M^2$$

$u = 0.02$ (bis 0.01)

K = nominale Blende (die am Objektiv eingestellte Blende)

M = Abbildungsmassstab

Einen Rechner für die Ermittlung der Stackschrittgrösse findet man unter:

www.focus-stacking.com/A/Schaerftiefe_Kurt_Wirz.xls

Ich verwende folgende Einstellungen:

Anzahl Bilder innerhalb der Schärfentiefe(ST) = 3 oder 6

3 für gute Bilder,

6 für sehr klare Bilder.

Okular, mit oder ohne?

Mit einem Okular wird das Zwischenbild des Mikroskopobjektivs dem Auge angepasst. Das Zwischenbild wird so vergrößert, dass mit dem Auge die volle Auflösung sichtbar wird und oft werden Abbildungsfehler (Aberration) des Mikroskopobjektivs korrigiert. Das Okular und das Mikroskopobjektiv sind aufeinander abgestimmt, damit ein möglichst fehlerfreies Bild für das Auge sichtbar wird. Mikroskopobjektive die betreffend der Aberration auf das passende Okular angewiesen sind, ergeben alleine vor eine Kamera montiert, kein qualitativ gutes Bild! Verwendet man eine abgestimmte Mikroskopobjektiv- und Okular-Kombination für die Fotografie, erreicht man keine optimale Auflösung in Bezug zur abgebildeten Bildbreite.

Das Mikroskopobjektiv bildet, entsprechend seiner Qualität, ein reales Objekt vergrößert und mit einer bestimmten Auflösung ab.

Das Okular kann die restlichen Aberrationen korrigieren und vergrößert das Bild, es erhöht die Auflösung nicht, macht sie lediglich für das Auge sichtbar!

Da das Okular das Bild vergrößert, wird der Bildausschnitt kleiner ohne dass die Auflösung erhöht wird.

Es gibt eine Ausnahme: ist das Auflösungsvermögen der Kamera gering, also kleiner als das vom Mikroskopobjektiv projizierte Bild, dann werden die kleinsten Details die das Mikroskopobjektiv liefert, vom Chip nicht aufgelöst. Dann kann es Sinn machen, die vom Mikroskopobjektiv gelieferten kleinsten Details mit einem Okular oder Zwischenlinse zu vergrößern, so dass der Chip der Kamera diese auflösen kann.

Hier spreche ich aber von einer Kamera, deren Pixel klein genug sind, um die kleinsten Details des Mikroskopobjektivs aufzulösen (z.B. Nikon D7100). Sie kann die 1000 Linienpaare/mm eines Mikroskopobjektivs 10/0.3 auflösen. Man spricht dann von einem Abbildungsmaßstab von 10:1. Das Original wurde 10x größer abgebildet, mit entsprechender Vergrößerung der kleinsten Details.

Würde man zusätzlich ein Okular oder Zwischenlinse verwenden, z.B. ein 5x Okular, wären die kleinsten Details 5x größer, es würden aber keine zusätzlichen, noch kleinere Details dazukommen, jedoch würde die Bildbreite auf 20% absinken. In diesem Falle spricht man von einer Vergrößerung mit Faktor 50 (10x5). Die Auflösung entspricht aber dem verwendeten 10/0.3 Mikroskopobjektiv.

Verwendet man ein Mikroskopobjektiv das 50 mal vergrößert (ohne Okular oder Zwischenlinsen), dann wäre die Bildbreite entsprechend der oben genannten Kombination von einem Mikroskopobjektiv 10/0.3 mit 5x Okular, doch die Auflösung würde mit etwa 2000 Linienpaaren/mm doppelt so hoch sein.

Verwendet man eine hochauflösende Kamera, dann machen Okulare und Zwischenlinsen betreffend Auflösung keinen Sinn!

Zum besseren Verständnis:

Ein Mikroskopobjektiv bildet ein reales Objekt mit einer bestimmten maximalen Auflösung ab, es hat eine Auflösungsgrenze.

Wird dieses Abbild noch einmal vergrößert, dann erhöht sich die Auflösung des Abbildes des realen Objektes nicht. Eine Nachvergrößerung kann nicht Details sichtbar machen, die über der Auflösungsgrenze des Mikroskopobjektivs liegen.

Auflösungsreduktion durch Erschütterung

Auf der Suche nach Schärfe und hoher Auflösung stösst man in der Fotografie auf das Problem der Erschütterungen während des Belichtens.

Bewegt sich das Objekt zur Kamera, die mit einer 1/125 Sek. auslöst bei einem Abbildungsmaßstab von 1:10 um eine Pixelbreite, dann sinkt die Auflösung um 50%. Der Chip einer Nikon D7000 besitzt eine Breite von 23.6mm mit 4928 Pixel. Die Breite eines Pixels ist somit $23.6 \text{ mm} / 4928 = 0.00479 \text{ mm}$ also etwa 4,8 Mikrometer. Bei einem Abbildungsmaßstab von 1:10 bildet ein Pixel eine Fläche ab, die in der Realität eine Breite von 48 Mikrometer hat.

Verschiebt sich nun die Kamera zum Objekt während 1/125 Sek. um 48 Mikrometer, dann sinkt die Auflösung auf die Hälfte. Die Verschiebung entspricht einer Geschwindigkeit von 21,6 Meter/Stunde.

Die Geschwindigkeit einer Schnecke ist etwa 7 Meter/Stunde. Bewegt sich ein Gegenstand zur Kamera (oder umgekehrt) mit dreifacher Schneckengeschwindigkeit, so sinkt die Auflösung auf 50%.

Um solche Verwackelung zu verhindern, wird die Kamera auf einem Stativ befestigt, das Objekt fixiert (oder bei Windstille fotografiert) und evtl. ein Bohnensack auf die Kamera oder Optik gelegt und ein Fernauslöser verwendet. Weitere Erschütterungen von viel höherer Geschwindigkeit erzeugt die Kamera durch den Auslösungsvorgang. Das Spiegelhochklappen erschüttert die Kamera, kann aber eine Sekunde vor der Belichtung erfolgen. Diese Erschütterung (Nikon D7000) dauert etwa 0,25 Sekunden. Die nächste Erschütterung (Verschluss öffnen) ist etwa halb so stark wie das Spiegelhochklappen, dauert aber nur 0.12 Sekunden (halb so lang wie die Spiegelschütterung) bis zur völligen Ruhe. 0.12 Sekunde entspricht 1/8 Sekunde. Die stärkste Erschütterung dauert 0.03 Sekunden (1/33 Sek.) danach sinkt sie kontinuierlich ab und nach 0.12 Sekunde ist Ruhe. Daraus zeigt sich, dass es sinnvoll ist den Blitz am Ende der Belichtungszeit auszulösen. Wird nicht geblitzt, dann ist bei einer Belichtungszeit von 1/33 Sek., während der ganzen Belichtungszeit die hauptsächlichste (stärkste) Erschütterung des Verschlusses vorhanden. Belichtet man mit 1/8 Sekunde dann wäre die Haupterschütterung nur 1/4tel der Belichtungszeit und somit müsste die Auflösung besser sein!? Jedoch ist es nicht eine Bewegung in einer Richtung, sondern um einen Punkt herum. Um wie viel Pixelbreite sich der maximale Ausschlag bewegt, konnte ich bis jetzt nicht feststellen.

Um zu sehen, wie sich diese Erschütterung auf die Auflösung eines Objektes auswirkt, habe ich die Auflösung bei unterschiedlicher Belichtungsdauer gemessen. Sowohl die Kamera, als auch das Objekt sind fix montiert. Um für mich massgebende Resultate zu erhalten, habe ich ein Abbildungsmaßstab von 2:1 gewählt.

Die Messresultate:

Bei einer Belichtungszeit von 5 Sekunden bis 1/8 Sek. beträgt die maximale Auflösung 160 Zeilenpaare pro mm.

Bei 1/15 Sek. 125 Zeilenpaare

Bei 1/30 Sek. sind es nur noch 110 Zeilenpaare!

Bei 1/60 und 1/125 Sek. sind es 125 Zeilenpaare.

Bei 1/250 bis 1/500 Sek. sind es 160 Zeilenpaare.

Bei 1/1'000 bis 1/2'000 Sek. sind es 180 Zeilenpaare.

Bei 1/4'000 bis 1/8'000 Sek. sind es 160 Zeilenpaare.

Mit Blitz sind es durchweg 180 Zeilenpaare.

Bei der kurzen Belichtungszeit mit Blitz ist die Erschütterung an wenigsten spürbar.

Hier wird die maximale Auflösung von 180 Zeilenpaaren erreicht

Ohne Blitz ist die gute Auflösung von 160 Zeilenpaaren bei 1/8 Sekunde und länger zu erreichen und ebenfalls auch bei einer Belichtungszeit von 1/250 bis 1/500 Sekunde. Bei einer Belichtungszeit von 1/1'000 bis 1/2'000 wird die maximale Auflösung von 180 Zeilenpaaren erreicht.

Bei 1/4'000 bis 1/8'000 Sekunde sinkt die Auflösung wieder auf 160 Zeilenpaare. Bei diesen extrem kurzen Zeiten ist der Schlitz des Verschlusses extrem schmal. Bei 1/4'000 Sek. ist der Schlitz etwa 1mm hoch und bei 1/8'000 nur noch 0.5mm, die Beugungsunschärfe an den Schlitzkanten dominiert im Bild.

Am meisten wackelt die Kamera bei 1/30 Sekunde, da ist die Auflösung am geringsten. Die höchste gemessene Auflösung beträgt 180 Zeilenpaare, die niedrigste ist bei 110 Zeilenpaaren, das sind nur noch 61%!

Meine Messungen basieren auf Vergleichsmesswerten und haben somit keine Relevanz für Vergleiche mit anderen Messungen ausserhalb meiner Messanordnung und Beurteilung. So gelten die Werte auch nur für mein Exemplar einer Nikon D7000!

Die Erschütterung während des Auslösevorganges kann mit einem Pickup eines Schallplattenspielers aufgezeichnet werden. Dazu legt man die Nadel auf die Kamera und zeichnet das vom Pickup abgegebene Signal über den Audioeingang eines Computers auf. Mit einer Audio-Software, z.B. Audacity, kann dann der zeitliche Ablauf der Erschütterungen am Computer sichtbar gemacht werden. Idealerweise wird das Audiosignal auf einem Stereokanal dargestellt, während auf dem zweiten Kanal das Lichtsignal des Blitzes mit einer SIEMENS Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit SFH 203 dargestellt wird. Sichtbar wird dadurch, dass beim Spiegelanheben, etwa eine Sekunde vor der Auslösung, sich die Erschütterungen durch den Spiegel bei der Blitzabgabe schon stark reduziert hat. Des Weiteren kann in einem abgedunkelten Raum die Erschütterung des sich öffnenden Verschlusses ebenfalls reduziert werden, wenn als Belichtungszeit etwa 1 Sekunde gewählt wird.

Ein stabiler Aufbau des Setups, Kamera bis Objekt ist natürlich Voraussetzung.

Bild 111 auf nächster Seite zeigt den ganzen Auslöseablauf.

Die obere Kurve zeigt den negativen Ausschlag des Blitzes (rechts am Ende des markierten Bereiches).

Von etwa 1.60 Sek. bis 1.95 Sek. ist die Erschütterung des Spiegelhochklappens, eine Sekunde vor Auslösung.

Der dunkel markierte Bereich zeigt die Belichtungszeit von 1/8 Sekunde.

Links die Erschütterung durch das Öffnen des Verschlusses, diese Erschütterung dauert etwa 2/3 der Belichtungszeit.

Rechts neben dem dunklen Bereich folgt die Erschütterung durch das Schliessen des Verschlusses und das Herunterklappen des Spiegels.

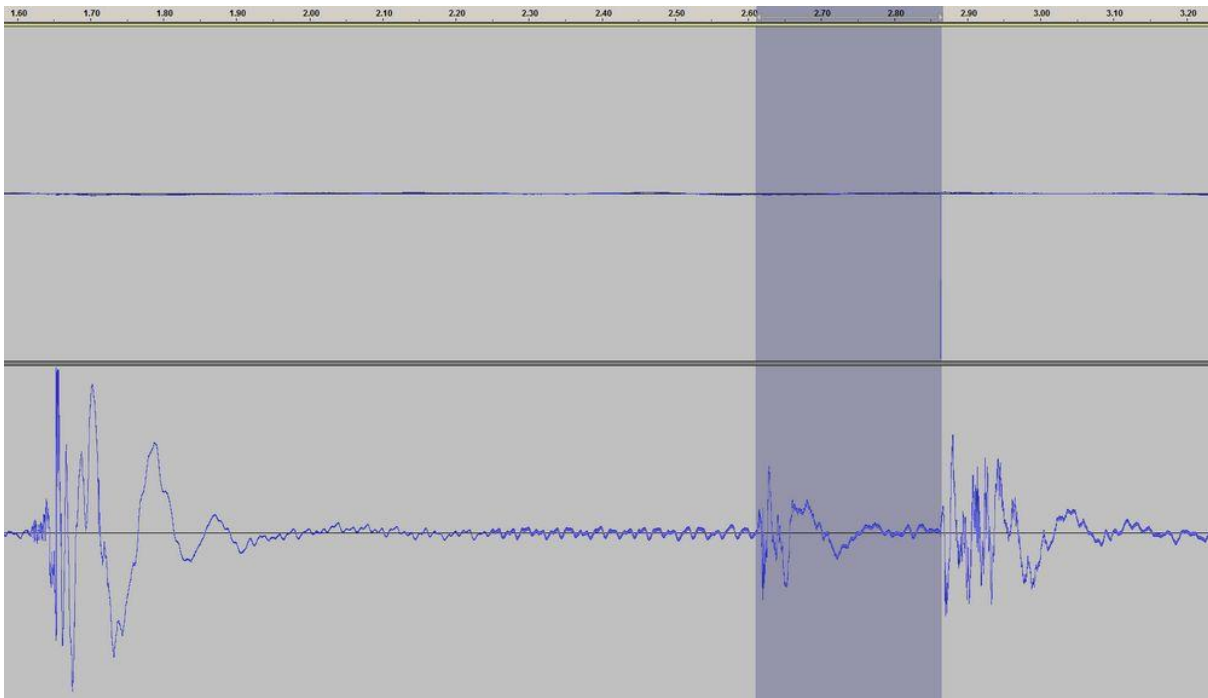


Bild 111, ganzer Auslösevorgang

Die untere Kurve im Bild 222 zeigt die Erschütterung der Kamera, noch einmal vergrößert. Auf der linken Seite die Erschütterung durch das Öffnen des Verschlusses, dann folgt bei der oberen Kurve der Impuls des Blitzes und gleich danach, bei der unteren Kurve, die Erschütterung des sich schliessenden Verschlusses und vom Herunterklappen des Spiegels.



Bild 222, dunkel markierter Bereich des Bildes 111

Dauerlicht oder Blitz.

Minderung der Auflösung durch Bewegung:

Vorausgesetzt, das Objektiv löst gleich hoch oder höher auf als die Kamera und das Objekt bewegt sich während der Belichtung um ein Pixel, dann reduziert sich dadurch die Auflösung auf die Hälfte.

Dies ist der Fall, wenn eine Kamera einen Pixelpitch (Pixelabstand) von $4\mu\text{m}$ besitzt, der Abbildungsmaßstab 1:1 beträgt, mit $1/125\text{Sek.}$ belichtet wird und sich das Objekt zur Kamera mit einer Geschwindigkeit von 0.0018 Kilometer pro Stunde bewegt.

Bei 10:1 ist dies bei einer Geschwindigkeit von 0.00018 km/h der Fall.

Diese Geschwindigkeit wird als Erschütterung durch Spiegelschlag oder den Verschlussvorgang ohne weiteres erreicht.

Es macht deshalb im Interesse einer hohen Auflösung Sinn, mit einer möglichst kurzen Belichtungszeit zu arbeiten. Handelsübliche Blitzgeräte besitzen bei reduzierter Leistung eine Abbrennzeit von etwa $1/20'000 - 1/40'000$ Sek., dadurch kann die Erschütterung 160 mal schneller, also 0.288 km/h betragen, bis sich die Auflösung auf die Hälfte reduziert. Das weiße Licht des Blitzgerätes bietet im Vergleich zu einer warmweißen Beleuchtung den Vorteil, dass die Wellenlänge des Lichtes kürzer ist und somit die Auflösung eher etwas höher.

Belichtungszeit, Verwischung, Auflösungsreduzierung bei 20:1

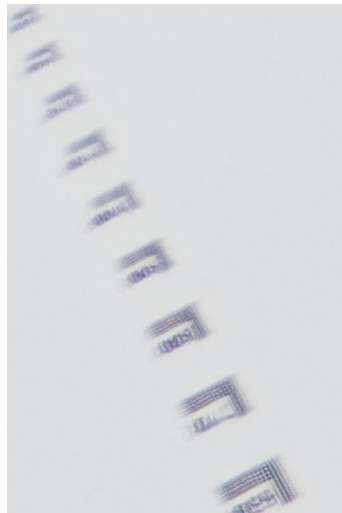
Erschütterung, ob durch Bewegungen in der Umgebung, des Setups, oder durch den Kameraverschluss, ergeben auch bei Focus-Stacking eine Verwischung der Bilder und eine reduzierte Auflösung.

Die Bilder wurden mit einem NIKON M Plan 20/0.4 LWD, 210/0 an einer Nikon D500 angefertigt, sie sprechen für sich!

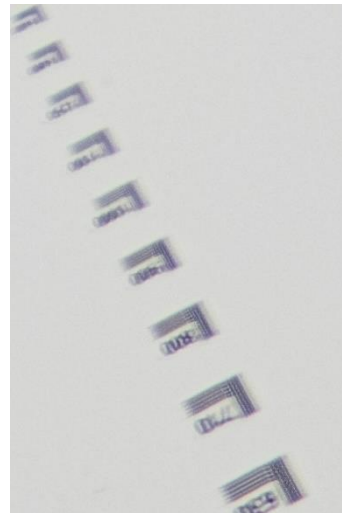
Es sind Bildausschnitte.



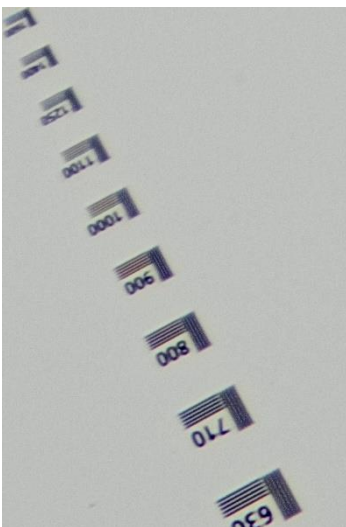
1/30 Sek. Dauerlicht



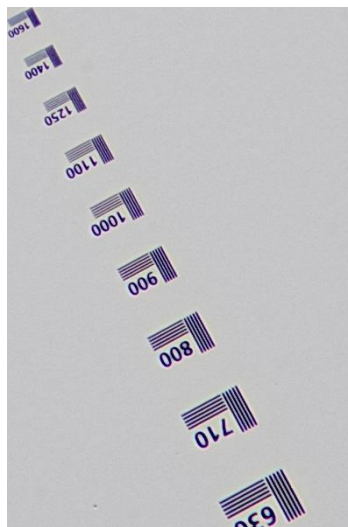
1/10 Sek. Dauerlicht



1/5 Sek. Dauerlicht



1 Sekunde Dauerlicht



Blitz

Bildkreis

Objektive projizieren ein rundes Abbild der Realität auf eine Fläche (Sensor).

Abbildungsfehler, auch Aberrationen genannt, treten verstärkt zum Bildrand auf.

Chromatische Aberration (CA)

Durch die unterschiedlich starke Brechung der Lichtstrahlen beim Übergang von Materialien mit unterschiedlichem Lichtbrechungsindex und bei unterschiedlicher Lichtwellenlänge, müssen die Objektive für eine fehlerfreie Projektion korrigiert sein. Sichtbar wird eine mangelhafte Korrektur oder Fehlanpassung oft durch farbige Ränder an markanten Objektkanten. Treten diese schon in der Bildmitte auf, ist das Objektiv von schlechter Qualität oder nicht richtig angepasst.

Lichtbrechungsindex, IOR - Index of Refraction:

Vakuum	=	1.0
Luft	=	1,000292
Wasser	=	1.3333
Flussspat	=	1.43
Quarzglas	=	1.46
Plexiglas	=	1.49
Kronglas	=	1.45 ... 1.66
Fensterglas	=	1.52
Quarz	=	1.54
Saphir	=	1.77
Bleikristall	=	1.93
Kristall	=	2.00
Diamant	=	2.43
Bleisulfid	=	3.9

"Schärfe"

Wenn durch die richtige Einstellung der Schärfe in der Bildmitte die Auflösung am höchsten ist, kann dies auch am Bildrand der Fall sein. Mikroskopobjektive, die speziell diese Korrektur beinhalten, tragen oft die Bezeichnung "Plan".

Z.B. NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0

Beim Focus-Stacking ist diese Eigenschaft nicht von sehr grosser Bedeutung, da in unterschiedlichen Schärfeebenen Aufnahmen angefertigt werden.

Verzeichnung

Wird ein kariertes Blatt (Häuschenblatt) fotografiert, so erkennt man, dass die Quadrate vorwiegend in der Bildmitte absolut quadratisch und gegen den Bildrand verzogen sind. Je nach Art des Verzuges nennt man die Verzeichnung kissenförmig (positive Verzeichnung) oder tonnenförmig (negative Verzeichnung). Korrigierte Objektive zeigen oft eine Mischung dieser Verzeichnung, die sich in einer wellenförmigen Abweichung vom idealen, unverzeichneten karierten Blatt unterscheiden. Die geraden Linien sind dann leicht wellenförmig.

Fotografiert man weder Architektur noch graphische Zeichnungen, sondern Tiere und Pflanzen, dann stört eine leichte Verzeichnung nicht.

Vignettierung

Die Vignettierung zeigt sich durch einen Helligkeitsverlust zum Bildrand. Sie kann mit der Bildbearbeitung durch Software ausgeglichen werden.

Auflösung

Objektive lösen in der Bildmitte am höchsten auf. Fotoobjektive weisen üblicherweise im benutzten Bildkreisausschnitt wenig Auflösungsabfall zum Rand auf. Sie lösen allerdings in der Bildmitte nicht so hoch auf wie Mikroskopobjektive, die allerdings zum Bildrand einen höheren Verlust der Auflösung aufweisen.

Vergleich bei Kamera mit Vollformat (24 x 36mm).

Objektiv / Abbildungsmaßstab /

Auflösung Bildmitte / Auflösung Bildrand / Auflösungsverlust am Bildrand:

-Fotoobjektiv, AF MICRO NIKKOR, 105mm, 1:2.8 D / 1:1 /

110LP pro mm / 100 LP pro mm / 9%

-Mikroskopobjektiv, NIKON M Plan 10/0.25, 210/0 / 10:1/

850LP pro mm / 480LP pro mm / 43%

Je kleiner der Ausschnitt des Bildkreises, um so geringer der Verlust zum Bildrand.

Unterschiedliche Objektive

Fotoobjektive besitzen eher einen grossen Bildkreis. Bei Verwendung von Zwischenringen oder/und Balgen, vergrössert sich der Bildkreis.

Bei den Kleinbildobjektiven sind die für Vollformat gerechneten Objektive die bessere Wahl, sie weisen zum Bildrand weniger Abbildungsfehler (Aberrationen) auf. Da diese Objektive speziell für Fotografie gerechnet sind, weisen sie eine einigermaßen gleich hohe Auflösung auf, die bis zum Bildrand geht. Fotoobjektive weisen einen natürlichen Kontrast auf, oft werden sie im Vergleich zu Mikroskopobjektiven als flau oder kontrastarm bezeichnet.

Helligkeitsübergänge erfolgen fein abgestuft. Dieser Mangel an Kontrast sagt aber nicht aus, dass sie weniger hoch auflösen. Bei der Bildbearbeitung kann der Kontrast erhöht werden.

Fotoobjektive sind für Fotografie gerechnet und deshalb sehr gut für Fotografie geeignet.

Lupenobjektive besitzen, wie die Fotoobjektive einen grossen Bildkreis.

So wie die Fotoobjektive, sind auch Lupenobjektive speziell für die Fotografie konstruiert.

Sie lösen in der Bildmitte nicht so hoch auf wie Mikroskopobjektive. ihre Auflösung ist bis zum Bildrand einigermaßen konstant und am Bildrand um einiges höher als bei Mikroskopobjektiven.

Lupenobjektive sind für Fotografie gerechnet und deshalb sehr gut für Fotografie geeignet.

Mikroskopobjektive besitzen eher einen kleinen Bildkreis (20mm).

Sie sind speziell für die Betrachtung mit dem Auge konstruiert. Also nicht für die Fotografie mit der Möglichkeit einer nachträglichen Bildbearbeitung. Sie lösen deshalb vorwiegend in der Bildmitte extrem hoch auf. Das Objekt (gewünschter Bildausschnitt) kann bei der Mikroskopie in die Bildmitte gerückt werden. Da das Bild direkt mit dem Auge betrachtet wird, zeichnen die Objektive kontrasthart, kleinste Details werden deshalb besser erkannt. Üblicherweise sind Mikroskopobjektive nicht voll auskorrigierte Objektive, sie sind auf eine weitere Linse oder Linsensystem (Okular) zur optimalen Entfernung von Aberrationen angewiesen (berechnet). Einige wenige Mikroskopobjektive sind voll auskorrigiert und können deshalb direkt, ohne Zwischenlinsen, an der Kamera angeschlossen werden, jedoch ist der Vergrößerungsfaktor einzuhalten.

Wird mit Mikroskopobjektiven fotografiert, dann können zu kontrasthart gezeichnete Bilder nur mit wenig Erfolg flauer gemacht werden. Helligkeitsunterschiede werden vom Objektiv nicht in sehr feinen Stufen abgebildet. Feine Helligkeitsunterschiede (Tonwerte) können nicht mit Software hergezaubert werden.

Mikroskopobjektive sind für die Betrachtung mit dem Auge gerechnet und deshalb nur bedingt für Fotografie geeignet.

Da alle Abbildungsfehler vermehrt am Bildrand auftreten, könnte man auf die Idee kommen, nur einen kleinen mittleren Bereich des Bildkreises zu nutzen.

Diese Idee ist nicht sehr vorteilhaft, da bei gleichbleibender Vergrößerung der Bildausschnitt dadurch auch verkleinert wird. Zu bedenken ist auch, vorausgesetzt der auf dem Chip abgebildete Bildausschnitt der Natur bleibt gleich gross, bei einem etwas grösseren Bildkreisausschnitt und stärkerer Vergrößerung, dass die Auflösung des Bildes um einiges höher ist, als wenn ein kleinerer Bildkreisausschnitt bei weniger Vergrößerung gewählt wird!

So ist bei einem gewünschten Bildausschnitt aus der Natur die Auflösung höher, wenn ein grosser Teil des Bildkreises des Objektivs Verwendung findet.

Bei gleicher Ausschnittgrösse des Bildkreises steigt die Auflösung bei Verwendung eines Objektivs mit höherer Vergrößerung, jedoch sinkt die dargestellte Bildbreite der Natur.

Diese Gegenspieler, Vergrößerung, Bildausschnitt und Auflösung müssen deshalb so gewählt werden, dass die Bildaussage optimal ist.

Vor der Anfertigung von Fotos sollte der Bildausschnitt gewählt und entsprechend das passende Objektiv gewählt werden. Ebenfalls sollte bei der vorbereitenden Betrachtung des Objektes, am besten am Binokular, entschieden werden, welches kleinste Detail gut erkennbar sein soll.

So sollte sich der Fotograf bewusst sein, was er zeigen will und die entsprechende Ausrüstung (Objektiv) wählen, so entstehen gute und aussagekräftige Bilder. Sucht man mit einer gewählten Ausrüstung (Objektiv) ein passendes Objekt, dann trifft eher selten der Fall zu, dass das Bild aussagekräftig wird.

Auflösung, Kamera, Objektiv

Kamera:

Nikon D300

Das theoretisch maximale horizontale Auflösungsvermögen einer NIKON D300, Chipgrösse 23.6x15.8mm (4352x2868 Pixel), beträgt $4352 / 2 = 2176$ LP/BB (Linienpaare pro Bildbreite).

Bei einem Abbildungsmassstab von 1:1 bedeutet dies, dass ein natürliches Objekt mit 92LP/mm aufgelöst werden kann.

Da die Chipbreite 23.6mm beträgt wird bei 1:1 ein 23.6mm breiter Bildausschnitt der Realität mit 2176 Linienpaaren in der Fokusebene abgebildet.

Pro Millimeter Bildbreite sind dies $2176 / 23.6 = 92.2$ LP/mm.

Nikon 7100

Chipbreite = 23.5mm, 6000x4000 Pixel.

Da die Chipbreite 23.5mm beträgt, wird bei 1:1 ein 23.5mm breiter Bildausschnitt der Realität mit 3000 Linienpaaren ($6000 / 2$) in der Fokusebene abgebildet.

Pro Millimeter Bildbreite sind dies $3000 / 23.5 = 127.7$ LP/mm.

Dies ist in etwa eine um 38% höhere Auflösung als bei der D300.

Objektiv:

Das Auflösungsvermögen eines Objektivs wird oft an einer hochauflösenden Kamera gemessen, jedoch löst oft die Kamera nicht so hoch auf wie das Objektiv und somit ist meist die Kamera das limitierende Glied in der Auflösung.

Weiter muss beachtet werden, dass die Werte der maximalen Auflösung bei einem Zebromuster ermittelt werden, wo der Helligkeitsunterschied zwischen den schwarzen und weissen Streifen noch 10% des maximalen Wertes beträgt. Verwendet man eine Kamera, die höher als das Objektiv auflöst, dann werden die Linienpaare, die weniger als 10% Helligkeitsunterschied besitzen, ebenfalls erfasst und können mit Software (Kontrasterhöhung in der Feinzeichnung) verstärkt und somit sichtbar gemacht werden. Objektive besitzen eine maximale Auflösung, sie ist unabhängig von der Kamera und der Distanz zwischen Objektiv und Kamera!

Das AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D kann ein Objekt mit maximal 320LP/mm abbilden. Bei 1:1 löst somit das AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D höher auf als die Kameras D300 und D7100.

Erst bei 2.5:1 kann die Kamera theoretisch die maximale Auflösung des Objektivs abbilden. $3000\text{LP/BB (Chipbreite)} / 320$ (maximale Auflösung der Optik, LP/mm) = 9.375mm in Realität.

Abbildungsmassstab = 23.5 (Chipbreite) / 9.375 (Bildbreite in Realität) = 2.5, also rein theoretisch bei 2.5:1.

Dies bestätigt sich in etwa auch in der Realität.

Das AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D, löst bei 4:1 mit 320 LP/mm auf und dieser Wert steigt nicht bei Erhöhen des Abbildungsmassstabes.

Es würde somit Sinn machen, bis 4:1 mit dem AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D eine noch höher auflösende Kamera als die D7100 zu verwenden.

Beim Lupenobjektiv ZEISS Luminar 25mm beträgt die maximale Auflösung 480LP/mm. Ich setze es im Bereich 5:1 bis etwa 8:1 ein.

Ab 3.8:1 kann die Kamera rein theoretisch seine volle Auflösung abbilden. Ein Objekt löst die Kamera mit dem ZEISS Luminar 25mm, bei 5:1 mit 430LP/mm auf.

Beim ZEISS Luminar 25mm löst somit die Kamera (D7100) genügend hoch auf.

Lupenobjektive besitzen einen optimalen Abbildungsmaßstab, bei welchem am meisten LP/BB erreicht werden. Dies ist aber nicht der Abbildungsmaßstab, bei dem die meisten LP/mm abgebildet werden.

Beispiel:

Luminar 25mm bei 10:1 erreicht 480 LP/mm. Bei einer Nikon D7100 beträgt die Chipbreite 23.5mm. Der Bildausschnitt bei 10:1 beträgt in Realität 2.35mm, daraus errechnet sich, $480 \text{ LP/mm} \times 2.35 \text{ mm} = 1128 \text{ LP/BB}$.

Luminar 25mm bei 5:1 erreicht 450 LP/mm. Die Bildbreite bei 5:1 beträgt 4.7mm. Daraus errechnet sich, $450 \text{ LP/mm} \times 4.7 \text{ mm} = 2115 \text{ LP/BB}$.

Daraus wird sichtbar, dass bei 10:1 kleinere Details sichtbar sind, die Menge an Information aber bei 5:1 fast doppelt so hoch ist.

Je nachdem, was man will, Auflösung der kleinsten Details oder ein Bild mit vielen (nicht ganz so kleinen) Details, muss man den dazu passenden Abbildungsmaßstab wählen. Zu bedenken ist, dass hohe Auflösung nicht das einzige Kriterium für ein gutes Bild ist. Oft dient es dem positiven Bildeindruck, wenn die kleinsten Details (z.T. auch feiner Schmutz) nicht abgebildet werden, aber die Kanten mit Bearbeitung klar hervorgehoben werden.

Bei Mikroskopobjektiven z.B. NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17, es löst bei 10:1 mit 1000LP/mm auf, löst die Kamera höher auf als das Objektiv, es wird somit die ganze Information des Objektivs von der Kamera erfasst.

10:1 bei Chipbreite 23.5 ergibt einen Bildausschnitt von 2.35 mm Bildbreite.

$2.35 \times 1000 \text{ LP/mm} = 2350 \text{ LP/BB}$,

dazu werden theoretisch $2 \times 2350 \text{ Pixel} = 4700 \text{ Pixel}$ benötigt.

Das kann die D7100 mit ihren 6000 Pixeln in der Bildbreite bestens verarbeiten.

Das NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0 löst mit 1800LP/mm höher auf als das NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17, jedoch beträgt die Bildbreite nur ein Viertel. $23.5 / 40 = 0.59 \text{ mm}$, dies ergibt auf die Bildbreite $(0.59 \times 1800) 1057 \text{ LP/BB}$, also werden zur Darstellung auf die Bildbreite nur etwa $(2 \times 1057) 2114 \text{ Pixel}$ benötigt.

Bei Mikroskopobjektiven ab 10-facher Vergrößerung löst die D7100 höher auf als Mikroskopobjektive.

Je stärker man vergrößert, umso kleinere Details werden sichtbar. Jedoch wird ab etwa 5:1 die gesamte Bildinformation zunehmend geringer, aber nicht in gleichem Verhältnis, sondern in immer sich steigenden höheren Masse.

Es ist deshalb für eine optimale Bildqualität mit einer hohen Vielfalt an Details dienlich, wenn so wenig wie möglich vergrößert wird.

Vollformat oder Kamera mit Crop-Faktor

Ein Vergleich.

	Crop-Faktor 1.5	Vollformat	Faktor
Kamera, Nikon	D7100	D810	
Chip Breite (mm)	23.5	35.9	1.53
Pixel Bildbreite	6000	7360	1.23
Chip Höhe (mm)	15.6	24	1.6
Pixel Bildhöhe	4000	4912	1.23
Chip Fläche (mm ²)	366.6	897.5	2.45
Pixel Fläche (MP)	24	36.15	1.5
Pixelpitch (µm)	4.17	4.88	1.17

12mm Gegenstandsbildbreite

Gleiches Objektiv,
bei unterschiedlichem Abbildungsmaßstab.

Objektiv Luminar 40mm, 1:4/A0.13

Abbildungsmaßstab	2:1	3:1	1.5
Auflösung			
Bildmitte (LP/mm)	210	270	1.3
LP / Bildbreite	2520	3240	1.3

Bei Vollformat wird eine Bildbreite von 12mm, 1.3 mal höher aufgelöst als bei Crop-Faktor 1.5.

12mm Gegenstandsbildbreite

Unterschiedliche Objektive,
die bei entsprechendem Abbildungsmaßstab optimal auflösen.

Objektiv AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D Luminar 40mm, 1:4/A0.13

	Crop-Faktor 1.5	Vollformat	Faktor
Abbildungsmaßstab	2:1	3:1	1.5
Auflösung			
Bildmitte (LP/mm)	180	270	1.5
LP / Bildbreite	2160	3240	1.5

Bei Vollformat wird eine Bildbreite von 12mm, 1.5 Mal höher aufgelöst als bei Crop-Faktor 1.5.

5mm Gegenstandsbildbreite

Gleiches Objektiv,
bei unterschiedlichem Abbildungsmaßstab.

Objektiv Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15

Abbildungsmaßstab	5:1	7.5:1	1.5
Auflösung			
Bildmitte (LP/mm)	430	465	1.08
LP / Bildbreite	2150	2325	1.08

Bei Vollformat wird eine Bildbreite von 5mm, 1.08 Mal höher aufgelöst als bei Crop Faktor 1.5.

4.5mm Gegenstandsbildbreite

Unterschiedliche Objektive,
die bei entsprechendem Abbildungsmaßstab optimal auflösen.

Objektiv	Luminar 25mm	Luminar 16mm, 1:2.5/A0.2	
	Crop-Faktor 1.5	Vollformat	Faktor
Abbildungsmaßstab	6:1	9:1	1.5
Aufl. Bildmitte (LP/mm)	450	665	1.48
LP / Bildbreite	2025	2993	1.48

Bei Vollformat wird eine Bildbreite von 4.5mm 1.48 Mal höher aufgelöst als bei Crop-Faktor 1.5.

Es wird somit ersichtlich, dass ein Bildausschnitt mit einer Vollformatkamera immer höher aufgelöst wird, sofern das Objektiv den grösseren Chip mit einem grösseren Bildkreis ausleuchten kann.

Hier noch einmal kurz, als Zusammenfassung die Faktoren der höheren Auflösung einer Vollformatkamera im Gegensatz zur Crop-Faktor 1.5 Kamera.

Bildbreite / Faktor

12mm / 1.3, bei gleichem Objektiv

12mm / 1.5, bei höher vergrößerndem Objektiv

5mm / 1.08, bei gleichem Objektiv

4.5mm / 1.48, bei höher vergrößerndem Objektiv

Bei gleichem Objektiv, das an einer Vollformatkamera bei einem höheren Abbildungsmaßstab eingesetzt werden muss, ist der Gewinn an Auflösung nicht so hoch, wie wenn zu einem stärker vergrößernden Objektiv gewechselt werden kann.

4.7 mm Gegenstandsbildbreite

Es ist möglich, dass ein Mikroskopobjektiv bei 5:1 in der Bildmitte etwa 5% höher auflöst als ein Zeiss Luminar.

Das NIKON CF Plan 5X/0.15 c_∞/0 BD DIC WD 12.0 ist ein Unendlich-Mikroskopobjektiv, das auf eine Tubuslinse angewiesen ist. In der Bildmitte, besitzt es bei 5:1 eine Auflösung von 450 LP/mm (Das Zeiss Luminar 25mm besitzt bei 5:1 in der Bildmitte eine Auflösung von 430 LP/mm). Wird das Mikroskopobjektiv an einer Vollformatkamera eingesetzt, dann sinkt die Auflösung zu den Bildecken auf 50%. Es ist somit für die Verwendung an einer Vollformatkamera nicht geeignet, da sein Bildkreis zu klein ist.

Nun könnte man mit einer entsprechenden zusätzlichen Zwischenlinse den Bildkreis vergrössern, so dass die Auflösung in den Bildecken höher ist. Dadurch bleibt in der Bildmitte die Auflösung bei 450 LP/mm, jedoch sinkt die dargestellte Bildbreite.

Verwendet man das NIKON CF Plan 5X/0.15 c_∞/0 BD DIC WD 12.0 an einer Nikon D7100, ist die Abbildung optimal und zeigt einen Bildausschnitt mit einer Bildbreite von (23.5mm / 5) 4.7mm.

Verwendet man, um diese Bildbreite von 4.7mm abzubilden, eine Vollformatkamera (Nikon D810) mit dem Luminar 25mm, 1:3.5/A0.15, dann ist ein Abbildungsmaßstab von (35.9mm / 4.7mm) 7.6 nötig.

Das Luminar 25mm, 1:3.5/A0.15 löst bei 7.6:1 in der Bildmitte mit 465 LP/mm auf.

Auch hier zeigt sich, dass die Kombination Vollformat mit Luminar um den Faktor 1.033 höher auflöst als die Kombination Crop-Kamera mit Mikroskopobjektiv!

Bei einer Gegenstandsbildbreite von 3.1mm und kleiner, ist die Verwendung einer Crop-Kamera mit nahezu voll auskorrigierten (CF) Endlich-Mikroskopobjektiven, die kein weiteres Linsensystem benötigen, zu bevorzugen.

Bei Verwendung einer Vollformatkamera kann es sein, dass das Bild beschnitten werden muss.

3.1 mm Gegenstandsbildbreite

Mitutoyo stellt Objektive mit einem Vergrößerungsfaktor von 7.5 und einer Apertur von 0.21 her. Für Vollformatkameras sind diese Objektive nicht geeignet, da ihr Bildkreis zu klein ist. An einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5 sind sie, mit einigen Verlusten in den Bildecken, noch einsetzbar. Ihre Auflösung in der Bildmitte, bei einer Apertur von 0.21, beträgt etwa 670 LP/mm. Bei 7.5:1 beträgt die Bildbreite an einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5 etwa (23.5 / 7.5) 3.1mm.

Die Auflösung auf die Bildbreite beträgt (3.1mm x 670 LP/mm) etwa **2100 LP/BB**.

Mit dem Luminar 16mm an einer Vollformatkamera muss, um eine Bildbreite von 3.1mm zu erreichen (35.9mm / 3.1mm), ein Abbildungsmaßstab von 11.5:1 angewendet werden. Das Luminar 16mm löst bei 11.5:1 in der Bildmitte mit 620 LP/mm auf.

Auf die Bildbreite ergeben sich dadurch (3.1mm x 620 LP/mm) etwa **1922 LP/mm**. Somit löst die Vollformatkamera mit Luminar 16mm auf die Bildbreite um etwa 9% geringer auf, als eine Kamera mit Crop-Faktor 1.5 mit einem Mikroskopobjektiv 7.5/0.21.

Verfügt man über kein Mikroskopobjektiv mit einer Vergrößerung zwischen 5 und 10, dann ist eine Crop-Kamera bei einer Bildbreite von 2.36 mm optimal.

Bei einer Vollformatkamera kann das Bild nach Bedarf beschnitten werden.

2.36 mm Gegenstandsbildbreite

Mit einer Vollformatkamera benötigt man ein Abbildungsmaßstab von (35.9 mm / 2.36 mm) 15.2:1.

Dazu dient das Luminar 16mm, es löst dabei in der Bildmitte mit 630 LP/mm auf. Dies ergibt auf die Bildbreite eine Auflösung von (2.36 mm x 630 LP/mm) **1487 LP/BB**.

Verwendet man an einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5 das NIKON M Plan 10/0.25, 210/0, löst es in der Bildmitte mit 850 LP/mm auf.

Dies ergibt auf die Bildbreite (2.36 mm x 850 LP/mm) **2005 LP/BB**.

Also eine etwa 35% höhere Auflösung als mit Vollformat und Luminar 16mm.

Verwendet man an einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5 das NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17, löst es in der Bildmitte mit 1000 LP/mm auf. Dies ergibt auf die Bildbreite (2.36 mm x 1000 LP/mm) **2360 LP/BB**.

Also eine etwa 60% höhere Auflösung als mit Vollformat und Luminar 16mm.

Kamera mit Crop-Faktor 1.5 oder mit Crop-Faktor 2.0 (z.B. Olympus).

An Mikroskopobjektiven ist die Randauflösung bei Kameras mit Crop-Faktor 2 und des dadurch kleineren Bildausschnittes etwas besser. Jedoch ist der Bildausschnitt entsprechend kleiner und für die gleiche Breite des Bildausschnittes muss optisch weniger vergrößert werden, was eine geringere Auflösung zur Folge hat.

Da die Luminare einen sehr grossen Bildkreis besitzen, ist der Qualitätsunterschied in den Bildecken bei einer Kamera mit Crop-Faktor 2 nicht sichtbar besser als mit einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5. Da bei der Kamera mit Crop-Faktor 2 bei gleichem Bildausschnitt weniger stark optisch vergrößert werden muss, ist die Auflösung mit der Kamera mit Crop-Faktor 2 um einiges geringer.

Somit bietet bei der Bildqualität eine Kamera mit Crop-Faktor 2 keinen Vorteil gegenüber einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5.

Zu bedenken ist, dass bedingt durch die geringere Schärfentiefe bei stärkerer Vergrößerung mit vergleichbarer Qualität, die Stackschritte kleiner sein müssen.

Dies ist allerdings im Bereich bis etwa 8:1 einfach zu bewerkstelligen.

Des Weiteren ist zu bedenken, dass bei Verwendung einer Vollformatkamera heller beleuchtet werden muss (da stärker vergrößert wird), auch dies ist im Bereich bis etwa 8:1 einfach zu bewerkstelligen.

Endlich- oder Unendlich-Objektive

Ein unendlich Mikroskop hat gegenüber dem endlich Mikroskop den Vorteil, dass im Strahlengang problemloser Filter, Strahlteiler und dergleichen angebracht werden können (zusätzlich ist eine Tubuslinse notwendig).

Kommen Mikroskopobjektive nicht am Mikroskop und ohne Filter, Strahlteiler und dergleichen zum Einsatz, sondern an einem Foto Setup, dann besteht kein zwingender Grund unendlich Mikroskopobjektive zu verwenden.

Für Fokus-Stacking-Bilder ist ein fotografischer Reprostand oder ähnliches Setup dienlich.

Kommen weitgehend voll auskorrigierte endlich-Mikroskopobjektive, die am Balgen oder Zwischenringe montiert sind zur Anwendung, wird ihr Zwischenbild direkt auf den Fotosensor projiziert, also ohne Zwischenlinsen. Die Abbildungsleistung entspricht absolut der Qualität von unendlich-Mikroskopeobjektiven.

Für die Fotografie ist deshalb die direkte Projektion mit endlichen CF und M-Plan Objektiven von Nikon, am Balgen oder Zwischenringen die einfachste Lösung für eine hervorragende Bildqualität.

Da für Mikroskopie unendlich Mikroskopobjektive von Vorteil sind (Filter, Strahlteiler, u.s.w.), werden zukünftig vorwiegend Mikroskopobjektive für das unendlich System entwickelt. Fortschritte in der Objektivkonstruktion werden dadurch vorwiegend bei den unendlich Mikroskopobjektiven zur Anwendung kommen.

Bei Verwendung von unendlich Mikroskopobjektiven ist eine passende Tubuslinse zwingend nötig.

Fliegenkopf Fotografie

Mit der Fliegenkopf Fotografie ist die Fotografie eines kreisrunden Objektes gemeint. Bei einer Vollformatkamera mit einem Seitenverhältnis von 2:3 (Faktor 1.5) wird die Bildbreite nicht voll ausgenutzt und somit kann der vom Objektiv in guter Bildqualität gelieferte Bildkreis kleiner sein.

Wird an einer Vollformatkamera bedingt durch das Objekt, das bis in die Bildecken optimal aufgelöst werden soll, eine gute Auflösung bis in die Ecken erwartet, dann muss der qualitativ gute Bildkreis des Objektivs einen Durchmesser von 43.2mm besitzen. Wird aber ein kreisrundes Objekt formatfüllend mit einer Vollformat-Kamera fotografiert, reicht ein qualitativ guter Bildkreis von 24mm (Bildhöhe).

Für die Fotografie geeignete Mikroskopobjektive können einen Bildkreis von 24mm in guter Qualität bis zum Bildkreisrand ausleuchten. Dies auch dann, wenn im Falle des Carl Zeiss Jena Semailan 6,3/0,16 160/- die Auflösung in den Bildecken der Vollformatkamera auf 71% im Vergleich zur Bildmitte absinkt.

Im Falle eines kreisrunden Objektes kann somit eine Vollformatkamera sehr gut mit Mikroskopobjektiven bestückt werden. Auch in diesem Falle hat die Vollformatkamera den Vorteil, dass 1.5 mal stärker vergrößert werden muss, wenn der gleichgrosse Objektdurchmesser formatfüllend fotografiert werden soll. Denn ein Objektiv mit einer 1.5 mal höheren Vergrößerung besitzt auch eine höhere Auflösung.

Bei der Wahl der passenden Kamera und dem passenden Objektiv, ist somit immer auch die flächige Ausdehnung des Objektes zu berücksichtigen!

Beispiel:

Ein Fliegenkopf oder kreisrundes Objekt mit einem Durchmesser von 2.4mm kann mit einer Crop-Kamera, Faktor 1.5 (Nikon D7100) mit einem Mikroskopobjektiv, Carl Zeiss Jena Semailan 6,3/0,16 160/- formatfüllend fotografiert werden, die Auflösung in der Bildmitte beträgt 600LP/mm.

Mit einer Vollformatkamera (Nikon D810) wird ein Objektiv benötigt, das 1.5 mal stärker vergrößert (1.5×6.3), also etwa 9.5:1. Dazu eignet sich ein NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17, es löst mit 1050LP/mm auf und dies mit einem im Bild nicht sichtbaren Auflösungsverlust in den Bildecken.

Dies ist eine Steigerung der Auflösung um 66%!

Arbeitsabstand, Auflösung

Es besteht zwischen dem freien Arbeitsabstand und der Auflösung, bei einem bestimmten Abbildungsmaassstab, ein Zusammenhang.

Der freie Arbeitsabstand ist die Distanz zwischen der Frontlinse und dem scharf abgebildeten Bereich eines Objektes. Je grösser diese Distanz, umso besser kann bei der Auflichtfotografie Licht gesetzt werden. Oft wird deshalb ein Objektiv gewählt, das einen hohen freien Arbeitsabstand besitzt. Allgemein zeichnen Objektive, die bei gleichem Abbildungsmaassstab einen kürzeren freien Arbeitsabstand besitzen, höher aufgelöst. Somit sind freier Arbeitsabstand und Auflösung Gegenspieler, je höher der Arbeitsabstand umso geringer die Auflösung und umgekehrt. Je grösser der Linsendurchmesser (je höher die Apertur oder je kleiner die Blendenzahl) bei gleichem Arbeitsabstand, umso höher die Auflösung.

Gegeben ist der freie Arbeitsabstand durch die Blende oder die Apertur.

Die folgenden Werte sind keine absoluten Werte, sie dienen lediglich dem Vergleich. Abbildungsmaassstab/Apertur/freier Arbeitsabstand/Auflösung LP/mm(Bildmitte)

1.5:1/0.089/110mm/180 (Blende = 5.6)

2:1/0.089/95mm/220 (Blende = 5.6)

3:1/0.11/73mm/230 (Blende = 4.5)

6:1/0.13/30mm/280 (Blende = 3.85)

6:1/0.15/16mm/400 (Blende = 3.5)

10:1/0.2/10mm/580 (Blende = 2.5)

10:1/0.25/10mm/800 (Blende = 2.0)

10:1/0.3/10mm/1000 (Blende = 1.67)

20:1/0.4/6mm/1250, LWD (Long Working Distanz) (Blende = 1.25)

40:1/0.5/10mm/1600, ELWD (Extended Long Working Distanz) (Blende = 1.0)

60:1/0.7/5mm/2250, ELWD (Extended Long Working Distanz) (Blende = 0.71)

100:1/0.8/2mm/2500, ELWD (Extended Long Working Distanz) (Blende = 0.62)

Gut erkennbar ist nicht nur, dass der freie Arbeitsabstand bei höherer Auflösung sinkt, sondern auch, dass eine grössere Frontlinse (höhere Apertur) bei gleichem freien Arbeitsabstand eine höhere Auflösung bringt.

Um genügend freien Arbeitsabstand bei 20:1 und höherer Vergrösserung zu erhalten, werden spezielle Mikroskopobjektive benötigt, die einen höheren freien Arbeitsabstand besitzen (LWD und ELWD), aber dadurch eine etwas geringere Auflösung besitzen.

Aus diesem Zusammenhang wird klar, dass ein Binokular mit stetig etwa 100mm Arbeitsabstand und einem Zoombereich von 7-30 X, bei einem Abbildungsmaassstab von 7:1 etwa eine Auflösung von 300LP/mm aufweist, diese jedoch bei 30:1 nicht nennenswert höher ist, also bei 100mm freiem Arbeitsabstand mit etwa 320LP/mm auflöst.

Ein Mikroskopobjektiv bei 30:1 besitzt einen freien Arbeitsabstand von etwa 8mm und eine Auflösung von etwa 1400LP/mm.

Das Binokular ist bestens geeignet um an einem Objekt zu arbeiten, aber seine Auflösung bei 30:1 ist zur Hauptsache eine "leere Vergrösserung"! So kann man in etwa anhand des freien Arbeitsabstandes, die Höhe der Auflösung abschätzen.

Zu bedenken ist, dass bei einem hohen freien Arbeitsabstand und somit einer etwas reduzierten Auflösung, die Beleuchtung optimaler und somit der gesamte Bildeindruck besser sein kann.

Eine möglichst hohe Auflösung ist somit nicht immer erstrebenswert!

Vergrosserung

Nicht so viel wie möglich, sondern so wenig wie nötig, sollte vergrössert werden!
Natürlich ist eine hohe Vergrösserung bei den Angaben zum Bild sehr eindrucksvoll, doch weit wichtiger ist die Bildaussage und dessen Qualität.

So sollte sich der Fotograf bei der Betrachtung eines Objektes klar werden, was er zeigen will und sich bewusst werden, welches kleinste Detail gezeigt werden soll. Daraus resultiert je nach Objektiv und Chipgrösse, die Grösse des Bildausschnittes, den er durch horizontales, vertikales Verschieben und Drehen, aussagekräftig wählen und in der Bildgestaltung berücksichtigen kann.

Je stärker ein Objektiv vergrössert, umso kleiner wird bei gleicher Chipgrösse der Bildausschnitt.

Bei stärkerer Vergrösserung werden kleinere Details sichtbar, die Anzahl der abgebildeten Linienpaare eines Millimeters der Realität wird höher.

Bei doppelt so hoher Vergrösserung reduziert sich der Bildausschnitt auf die Hälfte, jedoch steigt die Auflösung nicht auf die doppelte Anzahl Linienpaare pro Millimeter (LP/mm).

Je stärker vergrössert wird, umso kleiner wird somit die Anzahl der Linienpaare auf die Bildbreite (LP/BB).

Bei einer Chipbreite von 23.5mm.

4:1 = 1997 LP/BB

8:1 = 1410 LP/BB

40:1 = 940 LP/BB

Bei 40:1 werden somit auf die Bildbreite nur noch etwa halb so viel Linienpaare abgebildet wie bei 4:1. Bei stärkerer Vergrösserung wird der gesamte Bildinhalt somit immer geringer. Auch wenn ein erfahrener Mikroskopiker und Fotograf ein dargestelltes Objekt nicht kennt, kann es sein, dass er an der Bildqualität erkennt, ob es bei 4:1 oder 40:1 fotografiert wurde.

Wünscht man bei der Fotografie ein Bild mit möglichst viel Information und dennoch viele kleinste Details, muss man einen Kompromiss im Abbildungsmassstab finden, der zwischen Bildausschnittsgrösse und Auflösung besteht.

Also nicht sinnlos vergrössern und dadurch den Bildausschnitt sinnlos verkleinern.

Oft wird erwähnt, dass ein grösserer Chip eine geringere Schärfentiefe besitzt. Diese Aussage ist falsch, denn die Schärfentiefe wie auch der Abbildungsmassstab wird nicht durch die Grösse des Fotochips beeinflusst.

Möchte man ein Objekt formatfüllend aufnehmen, dann muss mit einer Vollformatkamera stärker vergrössert werden als mit einer Crop-Kamera oder einer Kamera mit einem noch kleineren Chip. Durch das stärkere Vergrössern wird optisch die Schärfentiefe geringer. Im Vergleich zu einer Crop-Kamera mit dem Formatfaktor 1.5 muss mit einer Vollformatkamera 1.5 mal stärker vergrössert werden, um den gleich grossen Bildausschnitt abzubilden und erst durch das stärkere Vergrössern reduziert sich die Schärfentiefe.

Befindet man sich im Bereich einer Vergrösserung über 1:1, kann es möglich sein, dass mit einer Vollformatkamera ein stärker vergrösserndes Objektiv gewählt werden muss. Dies hat den Vorteil, dass stärker vergrössernde Objektive üblicherweise auch höher auflösen. Jedoch muss gewährleistet sein, dass das Objektiv mit guter Qualität das Objekt auf dem grösseren Chip bis in die Ecken sauber abbilden kann. So sind die für Grossformat geeigneten ZEISS Luminar Lupenobjektive bestens für Vollformatkameras geeignet.

Bei der verkleinernden Fotografie wird ein Objekt auf dem Fotochip kleiner abgebildet als es in Realität ist. In diesem Bereich kommt die Optik gut zurecht und es können auch Objektive mit variabler Brennweite (Zoom) erfolgreich eingesetzt werden. Je höher der Abbildungsmassstab wird, um so kleiner wird der Einsatzbereich der Objektive.

Lupenobjektive können noch erfolgreich bei etwas unterschiedlicher Vergrößerung eingesetzt werden, während Mikroskopobjektive eine feste Vergrößerung besitzen. So ist bei Fotoobjektiven bei normalem Einsatz die Distanz zum Objekt weitgehend frei wählbar, es kann auf unterschiedliche Distanzen fokussiert werden. Lupen- und Mikroskopobjektive besitzen einen festen freien Arbeitsabstand, also einen Fixfocus! Fotoobjektive besitzen eine Blende und je nach Lichtstärke und gewünschter Schärfentiefe kann die Blende in einem weiten Bereich gewählt werden, ohne dass sich dies in grösserem Masse negativ auf die Auflösung auswirkt. Schon im Bereich der Makrofotografie mit Fotoobjektiven zeigt sich, dass die optimale Auflösung an eine bestimmte Blendenöffnung gebunden ist. Dies ist ebenfalls bei Lupenobjektiven so, wobei die offenste Blende bei Lupenobjektiven die am höchst auflösende ist. Mikroskopobjektive sind für eine ganz bestimmte Blende optimiert, es wird deshalb auf eine variable Blende verzichtet.

Fotoobjektive sind sehr flexibel und können den Gegebenheiten entsprechend gut angepasst werden, während Mikroskopobjektive für einen ganz bestimmten Gebrauch optimiert sind.

Um im Bereich des mikroskopischen Abbildungsmassstabes ein Maximum an Abbildungsqualität zu erreichen, ist ein ganz bestimmter optischer Aufbau nötig. Deshalb wird in diesem Bereich des Abbildungsmassstabes das ganze, optisch optimierte Setup, in Form eines Mikroskops verbaut. Die Verwendung von Fremdprodukten oder falsche Anwendung von Zubehör, äussert sich beim Mikroskop sehr schnell und stark mit einer Abnahme der Bildqualität.

Mikroskope sind optische Systeme, die meistens zweistufig sind. Sie bestehen vereinfacht dargestellt aus zwei optischen Einheiten (Linsensystemen). Das Objektiv ist für die Vergrößerung und die maximale Auflösung zuständig, das Okular für die augengerechte Darstellung.

In der Endlich-Mikroskopie ist das Objektiv für die Vergrößerung und die maximale Auflösung zuständig. Oft wird das Bild betreffend Abbildungsfehlern im Objektiv nicht voll auskorrigiert und ist deshalb auf ein ganz bestimmtes und somit passendes Okular angewiesen, das die restlichen Bildfehler des Objektivs weitgehend auskorrigiert. Objektiv und Okular sind somit ein ausgesuchtes, aufeinander abgestimmtes Paar, das in einer exakt einzuhaltenden Distanz zueinanderstehen muss. Das Okular hat neben der Kompensation von Restfehlern des Objektivs noch die Funktion, das Bild so zu vergrössern, dass das Auge die vom Objektiv abgebildete Auflösung auch sehen kann. Das Okular besitzt somit eine leere Vergrößerung, denn es vergrössert lediglich das vom Objektiv projizierte Bild und kann deshalb lediglich die Auflösung des Objektivs sichtbar machen, aber die Auflösung nicht erhöhen. Die Höhe der Auflösung ist somit durch das Objektiv bestimmt!

Ausserdem gehört es zur Aufgabe des Okulars, das Bild auf die Netzhaut abzubilden. Um nach dieser zweistufigen Anordnung einen Fotoapparat anzubringen, bedarf es der genauen Einhaltung der vorgesehenen Distanzen. Um erfolgreich am Mikroskop zu fotografieren, verwendet man deshalb am besten ein Trinokular-Mikroskop, das die Einrichtung für fotografische Zwecke schon besitzt und verwendet eine vom Hersteller empfohlene Kamera. Man muss sich aber klar sein, dass auch dieses Mikroskop, trotz Fototubus, nicht in seiner Gesamtheit für fotografische Zwecke ausgerichtet wurde, sondern wie die meisten Mikroskope, zur Beobachtung mit dem Auge optimiert ist und lediglich zusätzlich die Möglichkeit der Fotografie besteht. Diese mikroskopische Fotoeinrichtung kann sich preislich ohne weiteres im Bereich von 10000.- Euro bewegen.

In diesem Dokument beschreibe ich einen alternativen Weg mit einer digitalen einäugigen Spiegelreflexkamera (DSLR) mit einem vereinfachten Setup.

Aus der Beschreibung des Mikroskops wird ersichtlich, dass es optisch zweistufig ist. Es gibt im weiten Bereich der unterschiedlichen Mikroskopobjektive auch solche die für Auflicht gerechnet wurden und voll auskorrigiert sind, also nicht auf die Entfernung der Restfehler durch ein Okular angewiesen sind (es sind dies vor allem Objektive für die Metallurgie). Da bei der Fotografie das Bild mittels Okular nicht auf die Netzhaut vergrössert und angepasst werden muss, kann man auf diese zweite optische Stufe verzichten. Der ganze optische Aufbau vereinfacht sich dadurch und somit wird verhindert, dass durch Nichteinhalten der kritischen Distanzen Abbildungsfehler entstehen.

So besteht der Aufbau für fotografische Zwecke aus einem Objektiv, Balgen oder Zwischenringen und der Kamera. Also einem Setup, das dem Fotografen sehr vertraut ist und zusätzlich zur Verwendung von Fotoobjektiven und Lupenobjektiven geeignet ist. Sofern man die hier erwähnten Nikon MPlan Mikroskop Objektive verwendet, hat sich in der Praxis gezeigt, dass ihr Bildkreis gerade noch für ein Chip Format von etwa 23.5 x 15.6mm (Crop Format 1.5), also eine Diagonale von etwa 28mm ausreichend ist.

Beim Mikroskop wird der Vergrößerungsfaktor berechnet, indem man die Vergrößerung des Objektivs mit der des Okulares multipliziert.

Bei Verwendung eines 10/0.30 Objektivs mit einem Okular von 12.5X errechnet man die Gesamtvergrößerung, 10 (Objektiv) X 12.5 (Okular) und erhält somit eine Vergrößerung von 125 X bei einer Auflösung, die dem Objektiv entspricht. Bei dem vereinfachten Setup spricht man von einer 10fachen Vergrößerung bei gleicher Auflösung wie beim oben erwähnten zweistufigen Mikroskop-Setup. Mikroskopobjektive wurden nicht speziell für die Fotografie berechnet, jedoch gibt es in diesem Bereich des Abbildungsmassstabes keine qualitativ vergleichbaren Fotoobjektive.

Aus den erwähnten Gründen können beide Anordnungen (Mikroskop und Foto Setup) nicht 1:1 miteinander verglichen werden.

Vergrößerung oder Abbildungsmassstab.

Vergrößerung bezieht sich auf die vergrösserte Abbildung eines bestehenden Abbildes. Zum Beispiel das Vergrössern eines Fotonegatives auf Fotopapier. Vergrössert man ein Bild, dann erhöht sich die Auflösung nicht, sie kann höchstens besser sichtbar werden. Der Abbildungsmassstab gibt an, wie sich die Grösse des Abbildes zum Original verhält. 10:1 bedeutet, dass das Abbild 10mal grösser ist als das Original.

Wird der Abbildungsmassstab mit einem stärker vergrößernden Objektiv erhöht, so erhöht sich ebenfalls die Auflösung!

Telekonverter und Vorsatzlinsen vergrössern wohl das Bild und verkleinern den Bildausschnitt aber sie erhöhen nur selten die Auflösung des Bildes, es sind also oft leere Vergrößerungen zu Ungunsten der gesamten Bildinformation (kleinerer Bildausschnitt). Verwendet man an einer 10MPixel DSLR ein sehr gutes Fotoobjektiv, dann löst das Objektiv höher auf, als die Kamera es wiedergeben kann.

Wird nun zusätzlich ein Telekonverter montiert, werden die kleinsten Details die das Objektiv wiedergeben kann, grösser auf dem Foto-Chip abgebildet und es werden somit mehr Details von der Kamera erfasst. Es scheint, als ob sich bei gleichem Objektiv, dank des Telekonverters, die Auflösung erhöht hat.

Macht man den gleichen Vergleich mit einer hochauflösenden 36MPixel Kamera, dann löst die Kamera etwa gleich hoch auf wie das Objektiv. Setzt man nun noch den Telekonverter dazu, dann werden meist keine weiteren Details sichtbar! Also eine klar sichtbare "leere

Vergrosserung". Oft leidet die allgemeine Bildqualität durch den Konverter und die Auflösung in den Bildecken ist mangelhaft.

Es ist also sinnvoller, aber teurer, an Stelle eines Telekonverters eine höher auflösende Kamera einzusetzen, denn dann bleibt auch der grössere Bildausschnitt erhalten.

Bildausschnitt und Abbildungsmaassstab

Bildausschnitt:

So wie jede Landschaftsfotografie einen aussagekräftigen Bildausschnitt sucht, ist auch bei der Makro- und Mikrofotografie der Bildausschnitt ein wichtiges Gestaltungselement. Man sollte sich Gedanken machen, was exakt man zeigen will und dieses dann in den Bildausschnitt einpassen, durch horizontales, vertikales Verschieben und durch Drehung. Ebenfalls dienlich ist die Ausrichtung nach dem "Goldenen Schnitt" oder der "Fibonacci Spirale".

Hilfreich kann es sein, wenn man sich mit den unterschiedlichen Bildausschnitten bekannt macht. Sucht man im Internet unter "Einstellungsgrösse", findet man Gründe für einen Bildausschnitt, der einer Bildgestaltung dienlich ist. So kann eine axiale Symmetrie, seltener eine Punktsymmetrie angestrebt werden. Die leichte, natürliche Asymmetrie macht das Bild interessant und fordert zum Verweilen und Vergleichen der Seiteninhalte auf. Natürlicherweise findet sich ein naher Punkt (Erde) im unteren Bereich des Bildes, während im oberen Bildteil die weiter entfernten Punkte (Himmel) sind. Gefühlsmässig spricht ein Bild am ehesten an, wenn der naheliegendste Punkt, unten links und der entfernteste, oben rechts ist.

Abbildungsmaassstab:

Oft kann mit Verschieben und Drehen kein aussagekräftiger Bildinhalt erreicht werden, es kann somit auch nötig sein, den Bildausschnitt in seiner Grösse anzupassen.

Was ist das Ziel des Bildes, will man einen Überblick oder kleinste Details zeigen? Der am Mikroskop sitzende Betrachter kann einfach das Objekt bewegen und so zum Überblick den Ausschnitt verändern und durch Drehen am Objektivrevolver ein Objektiv mit einer anderen Vergrösserung wählen. Diese Möglichkeit hat ein Bildbetrachter nicht, deshalb muss sich der Fotograf klar sein, was er zeigen will. Zeigt er einen Überblick, sind die kleinsten Details nicht so gut sichtbar, als wenn er eine höhere Vergrösserung wählt, die aber einen kleineren Bildausschnitt zeigt. Der Zusammenhang zwischen Auflösung und Bildausschnitt ist nicht linear. Vergrössert man auf das doppelte, also halbe Bildbreite, dann steigt die Auflösung NICHT auf das doppelte, somit wird die Information des Bildinhaltes immer kleiner, je stärker man vergrössert.

Beispiel:

Der folgende Vergleich bezieht sich auf eine Kamera mit einem Chip, der 23.5mm breit ist (Nikon D7100).

Ein Zeiss Luminar 40mm löst bei **4:1** mit 340 LP/mm auf, die Bildbreite beträgt 23.5mm / 4 = 5.875mm,

das ergibt auf die Bildbreite: $340 \text{ LP/mm} \times 5.875 \text{ mm} = \mathbf{1997.5 \text{ LP/BB}}$ (BB = Bildbreite).

Bei doppelter Vergrösserung, also 8:1 löst das Luminar 40mm mit 380 LP/mm auf, also nicht doppelt so hoch.

Verwenden wir deshalb ein Objektiv, das bei 8:1 optimal auflöst.

Das Zeiss Luminar 25mm löst bei 8:1 mit 480 LP/mm auf, also ebenfalls nicht doppelt so hoch wie das Luminar 40mm bei 4:1.

Bei **8:1** beträgt die Bildbreite $23.5 \text{ mm} / 8 = 2.94 \text{ mm}$, auf diese Bildbreite ergibt dies: $2.94 \text{ mm} \times 480 \text{ LP/mm} = \mathbf{1411.2 \text{ LP/BB}}$.

Das Mikroskopobjektiv NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0 löst mit 1600 LP/mm auf. Die Bildbreite bei **40:1** beträgt $23.5 \text{ mm} / 40 = 0.5875 \text{ mm}$, dies ergibt auf die Bildbreite. $1600 \text{ LP/mm} \times 0.5875 \text{ mm} = \mathbf{940 \text{ LP/BB}}$.

Im Vergleich:

4:1 = 1997 LP/BB

8:1 = 1411 LP/BB

40:1 = 940 LP/BB

Beim Betrachten durch das Mikroskop erkennt man bei stärkerer Vergrößerung immer mehr Details, bei der Fotografie ebenfalls, doch sinkt die gesamte Bildinformation (LP/BB) stark!

Beim verstärkten Vergrössern nimmt somit die Auflösung zur Freude des Mikroskopikers und Fotografen zu, die gesamte Bildinformation aber zum Leid des Fotografen ab.

Somit ist es für den Fotografen von höchstem Interesse, die dienlichste Vergrößerung zu wählen! Der Fotograf muss zwischen Auflösung, kleinster gewünschter Darstellung von Details und maximaler Bildinformation einen sinnvollen Kompromiss wählen.

Erwähnt sei hier ausdrücklich, dass zum Gelingen eines guten Bildes nicht immer die höchst machbare Auflösung gefordert ist. Oft ist es dienlicher, sich zu entscheiden, was das kleinste gut erkennbare Detail in einem Bild sein soll und danach die Vergrößerung zu wählen, mit der sich daraus ergebenden Grösse des Bildausschnittes.

Beleuchtung

Bei der hier beschriebenen Beleuchtung handelt es sich immer um Auflicht-Beleuchtung. Steht nur eine Lichtquelle zur Verfügung, ohne Diffusor, resultiert ein sehr kontrasthartes Bild, das meistens nicht zu gebrauchen ist.

Wird um das Objekt ein Diffusor angebracht, es kann ein weisses Papier, weisser Joghurt- oder ein Trinkbecher sein, werden die Helligkeitsunterschiede des Objektes in feineren Abstufungen gezeichnet. Für fast plane Objekte ist diese Art der Beleuchtung oft optimal, da eine leichte Schattenbildung die Kanten der Strukturen klar erkennen lässt. Bei gewölbten Objekten entsteht aber oft ein zu starker Bildkontrast. Während Bereiche sehr hell sind, saufen dunkle Bereiche im Schwarz ab.

Mehrere Lichtquellen und ein dickwandiger Diffusor (z.B. Styropor Trinkbecher), mindern den Bildkontrastumfang. Die Lichtquellen können zur leichten Schattenbildung vorwiegend in einem Bereich (um 270°) positioniert werden. Nur bei symmetrischen Objekten muss darauf geachtet werden, dass die Lichtquellen ebenfalls symmetrisch angeordnet sind. Bei der Beurteilung ist Vorsicht geboten, das kontrastarme und flauere Bild wird oft als nicht hoch aufgelöst empfunden. Das ist ein Trugschluss, denn die Detailzeichnung ist vorhanden und kann mit Software bestens hervorgehoben werden, ohne dass der gesamte Bildkontrast zu hoch wird.

Bei der Einzelbildbetrachtung ist auf das Histogramm zu achten, es sollte ein Berg inmitten des Bereiches sein, wobei dieser Berg eher näher beim dunklen Ende des Histogramms sein sollte, also etwa 2 Blenden unterbelichtet. Die Stacking-Software neigt eher dazu, helle Bereiche noch heller wiederzugeben. Ebenfalls wird bei der Betrachtung von Einzelbildern, wenn die hellsten Bereiche nicht im Fokus liegen, die Helligkeit oft falsch bewertet.

Um ein unverwackeltes und somit hoch aufgelöstes Bild zu erhalten, empfehle ich Blitzgeräte zur Beleuchtung (Siehe Kapitel: "Auflösungsreduktion durch Erschütterung" und "Dauerlicht oder Blitz").

Ob ein Bild mit 8, 12 oder 14Bit Farbtiefe aufgenommen wurde, ist bei der Betrachtung am Monitor oft nicht sichtbar, erkennbar wird es aber ganz klar, wenn das Bild bearbeitet werden muss und dies ist bei Focus-Stacking meistens der Fall. Da beim Fotografieren nicht der ganze Bereich des Helligkeitsumfanges genutzt wird und somit im JPG Format (8Bit) nicht alle 265 Helligkeitsstufen ausgenutzt werden, (bei der Helligkeitsanpassung mit Bearbeitung entstehen Tonwertabrisse), ist zu empfehlen, das RAW Format der Kamera anzuwenden.

Das übliche 12Bit Raw Format besitzt 4096 Helligkeitsstufen und das oft auch mögliche 14Bit Format sogar 16384. So bleiben im RAW Format viele Helligkeitsstufen erhalten, auch wenn man nicht den gesamten Helligkeitsbereich der Kamera beim Fotografieren ausnutzt.

Es ist wichtig, dass bei der Umwandlung der RAW Bilder das TIF 16Bit Format gewählt wird, denn nur so bleibt die gesamte Bildinformation erhalten.

Ebenfalls wichtig ist, dass die Focus-Stacking-Software das 16Bit TIF Format unterstützt. Helligkeitsanpassungen einzelner Bereiche sollten während der Bearbeitung angepasst werden.

Erst wenn die Bearbeitung mit Software abgeschlossen ist, wird die gesamte Bild-Helligkeitsverteilung ohne Entstehung von Tonwertabrissen, auf den gesamten Helligkeitsbereich angepasst. Dies ist gut im Histogramm ersichtlich.

JPG oder RAW zu TIF, Belichtung (ETTR) und Histogramm

Wird beim Fotografieren im JPG Bildformat gespeichert, erhält man kleine Dateien und es können somit viele Bilder auf einer Speicherkarte aufgezeichnet werden. Ebenfalls eignet sich das JPG Format zur Präsentation im Internet.

So bezieht sich das in der Kamera und der Bearbeitungs-Software angezeigte Histogramm auch auf den Helligkeitsbereich, der mit dem JPG Format gespeichert wird. Zur richtigen Beurteilung der Belichtung sollte nicht nur die meist in weiss angezeigte Luminanzkurve begutachtet werden, sondern auch die Kurven der einzelnen Farben, Rot, Grün und Blau (RGB). Die Luminanzkurve zeigt den Durchschnitt der einzelnen Farbkanäle an und somit nicht gut sichtbar eine mögliche Überbelichtung in einem Farbkanal.

Im Folgenden nenne ich dieses von der Bearbeitungssoftware (z.B. Photoshop) angezeigte Histogramm "JPG Histogramm".

Das richtige Belichten im JPG Format ist somit einfach zu bewerkstelligen.

Der Vorteil der kleinen Dateien im JPG Format, der durch die Komprimierung der Bildinformation entsteht, hat aber auch einen Nachteil: bei jedem Abspeichern werden die Dateien erneut komprimiert, die Dateien werden kleiner und die Qualität sinkt.

Deshalb sollten JPG Dateien nicht bearbeitet werden. So wie das 8 Bit JPG Format ist auch das 8 Bit TIF Format, das ebenfalls die Farbtiefe mit 8 Bit abspeichert, anfällig für Artefakte und zeigt sehr schnell Tonwertabrisse. Für eine erfolgreiche Bearbeitung sollte die Bilddatei im 16 Bit TIF Format vorliegen.

Beim Fotografieren steht zur Abspeicherung in der Kamera neben dem 8 Bit JPG Format, auch das empfehlenswerte RAW Format mit 12 oder 14 Bit zur Verfügung. (Unter "Tonwerte" versteht man die Helligkeitsstufen in einem Farbkanal).

Die Formate unterscheiden sich folgendermassen:

Format	Farbtiefe	Tonwerte jeder Farbe	Anzahl Farben
JPG	8 Bit	256	16'777'216
RAW	12 Bit	4096	68'719'476'736
RAW	14 Bit	16384	4'398'046'511'104

Das Abspeichern im 16 Bit TIF Format ist manchmal in der Kamera auch möglich, doch durch die sehr grossen Bild-Dateien ist es nicht empfehlenswert.

Speicherformate, in welche die RAW Bilder umgewandelt werden können:
(Das JPG Format kann direkt weiterverwendet werden).

RAW Dateien sollen in das TIF-Format umgewandelt (entwickelt) werden.

Format	Farbtiefe	Tonwertstufen	Anzahl Farben
TIF	8 Bit	256	16'777'216
TIF	16 Bit	65536	281'474'976'710'656

Das JPG Format (8 Bit) komprimiert die Dateien verlustbehaftet, bei jedem Abspeichern gehen Informationen verloren.

Das unkomprimierte TIF 8 Bit Format, kann ohne Verlust mehrfach abgespeichert werden. Beide 8 Bit Formate sind nicht empfehlenswert, da sie lediglich 256 Tonwerte (Tonwertstufen) je Farbe besitzen und somit beim Bearbeiten nur wenig Spielraum vorhanden ist, was sich sehr schnell in Tonwertabrissen äussern kann.

(Für fertig bearbeitete Bilder eignet sich das JPG Format, um Bilder im Internet zu zeigen. Da seine Datenmenge gering ist, wird es schnell übermittelt).

Muss man Bilder bearbeiten, eventuell sehr stark, wie es beim Focus-Stacking oft der Fall ist, dann ist das Fotografieren und Aufzeichnen der Bilder im RAW Format

empfehlenswert. Am besten wird im RAW Format mit der höchsten Bit Zahl abgespeichert. Ich erwähne hier das 12 und 14 Bit RAW Format, das die Nikon D810 bietet. Diese RAW Dateien sollen anschliessend in das 16 Bit TIF Format umgewandelt (entwickelt) werden, da nur dann die volle Bildinformation der Kamera erhalten bleibt und somit der grösste Spielraum bei der Bearbeitung vorhanden ist.

Belichtung

Bei der Aufzeichnung im JPG Format stehen 256 Tonwertstufen zur Verfügung. Um den vollen Umfang der Tonwertstufen auszunutzen, ist eine richtige Belichtung nötig. Diese wird mit Belichtungsmesser oder anhand des Histogramms bewerkstelligt. Ich empfehle nicht nur die Luminanzkurve des Histogramms zu beurteilen, sondern alle Farbhistogramme und Kurven anzeigen zu lassen, damit sicher nicht in einer oder mehreren Farben überbelichtet wird. Das oft als weiss angezeigte Luminanz-Histogramm ist der Durchschnittswert aller Farben. Bei einem Bild, das von einer oder auch zwei Farben dominiert wird, ist das (durchschnittliche) Luminanz-Histogramm nicht geeignet, da es die Übersteuerung eines oder zweier Farbkanäle nicht anzeigt und somit eine oder zwei Farben überbelichtet sein könnten.

Es ist also nötig, dass immer die Histogramme aller Farbkanäle angezeigt werden! Das Histogramm, das die Kamera und die Bearbeitungssoftware zeigt, besitzt in jeder Farbe (RGB) jeweils 256 Stufen (0-255), wobei 255 den hellsten Wert der entsprechenden Farbe darstellt. Eine Blende dunkler trägt den Wert 223 usw. In einer JPG Datei sind diese Zahlenwerte für jeden Farbkanal gespeichert, z.B. ein mittelhelles reines Grün, als 000,180,000.

Blendenwert eines Farbkanals und die entsprechend abgespeicherte Zahl.

0	255 hellster Wert
-1	223
-2	179
-3	122
-4	68
-5	34
-6	17
-7	8
-8	4
-9	2
-10	1

Misst man in einem Bild einen Helligkeitwert von 122, dann bedeutet dies, dass es einer Helligkeit entspricht, die um 3 Blenden geringer ist als die maximale Helligkeit mit dem Wert 255.

Ersichtlich wird aus der Tabelle auch, dass der Verlauf von hell (255) zu dunkel (0) nicht linear verläuft.

Um eine Blende geschlossener entspricht der halben Lichtmenge. Wären die gespeicherten Zahlen linear zur Lichtmenge, dann müsste eine Blende geschlossener einem Zahlenwert, der die Hälfte von 255 beträgt entsprechen, also etwa 128. Da die Aufzeichnung aber nicht linear zur Lichtmenge steht, beträgt der Wert nicht 128, sondern wie oben zu sehen ist 223. Vom Auge betrachtet wird bei der Darstellung am Monitor oder bei Ausdrucken, der optische Unterschied zwischen dem Wert 255 und 223 als ein Blendenwert empfunden. So ebenfalls auch der Unterschied zwischen 179 und 122.

Aus den oben aufgelisteten Zahlenwerten, die sich auf einen Blendenwert beziehen, wird auch ersichtlich, dass der Bereich der hellsten Blende, die von 223 bis 255 geht, lediglich aus 32 Tonwertunterschieden besteht. Bei der Darstellung am Monitor oder für Ausdrücke kann dies genügen.

In dieser Weise wird das Histogramm in der Bearbeitungs-Software angezeigt, es hat somit eine feste Beziehung zum JPG Format, deshalb nenne ich diese Histogramme im Folgenden "JPG Histogramm".

Es unterscheidet sich klar vom RAW Histogramm, das mit spezieller Histogramm-Software am Monitor des Computers angezeigt werden kann (z.B. RawDigger).

Belichten nach rechts (in den hellen Bereich) auch ETTR (Exposing to the right) genannt. ETTR funktioniert und macht Sinn, wenn es bei der Grundempfindlichkeit einer Kamera angewendet wird!

Wird es bei erhöhter Empfindlichkeit angewandt, z.B. wird bei einer Einstellung der Kamera von 400 ISO um eine Blende überbelichtet und bei der Entwicklung um eine Blende abgedunkelt, ist das Ergebnis (z.B. Rauschen) vergleichbar, wie wenn man mit 200 ISO und korrekter Belichtung fotografiert hätte.

Also kein Gewinn durch ETTR!

Ein effektiver Gewinn und somit höheren Rauschabstand erhält man vor allem dann, wenn bei der Grundempfindlichkeit (Nikon D810 = 64 ISO) eine Belichtung nach ETTR ausgeführt wird. Ebenfalls werden nur dann im RAW Format in der hellsten Blende alle Tonwertstufen genutzt, das sind 50% aller Tonwertstufen im RAW Format!

Fotografiert man im RAW Format entsprechend dem angezeigten JPG Histogramm, dann belichtet man bei der Nikon D810 um 2.5 Blenden zu dunkel.

Dies bemerkt man üblicherweise nicht, da bei der Konvertierung (Umwandlung oder Entwicklung) in das TIF Format, die nach dem JPG Histogramm erfolgte Belichtung ebenfalls dem JPG Histogramm des entwickelten TIF Bildes entspricht.

Wird im RAW Format fotografiert, das bei der Nikon D810 nach oben 2.5 Blenden weiter geht als das JPG Histogramm anzeigt, kann aber entsprechend diesem JPG Histogramm überbelichtet werden, ohne dass Zeichnung verloren geht. Bei der Entwicklung (Umwandlung, Konvertierung) in das TIF Format muss dann bei den Einstellungen, damit der hellste Bereich auch mit Zeichnung am Monitor oder bei Ausdrucken dargestellt werden kann, die Belichtung (Helligkeit) entsprechend der Kamera herunter genommen werden. Bei der Nikon D810 sind es 2.5 Blenden, um welche die Belichtung (Helligkeit) reduziert werden muss.

Wie misst man nun bei der eigenen Kamera, um wie viele Blenden im RAW Format, überbelichtet werden kann, ohne dass ein Verlust eintritt?

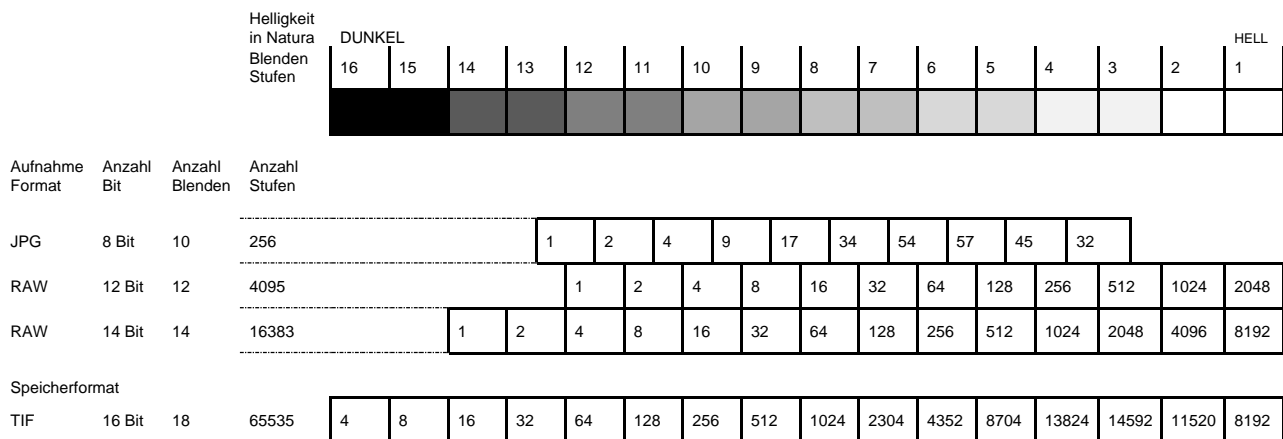
Fotografiert wird im RAW Format ein weisses Blatt (Kamera mit Grundempfindlichkeit).

Vorerst wird die Belichtung so eingestellt, dass die Helligkeit im JPG Histogramm gerade den Wert 255 erreicht. Dann öffnet man die Blende um 4 volle Blendenwerte, oder multipliziert die Belichtungszeit mit dem Faktor 16. So wird ein Bild belichtet, das um 4 Blenden überbelichtet ist, also alle Farbkanäle den maximal möglichen Wert anzeigen. Das RAW Bild wird anschliessend z.B. mit Camera Raw von Photoshop geöffnet. Im JPG Histogramm (es ist kein RAW Histogramm!!) sieht man ganz rechts einen weissen Balken und die Warnanzeige der Überbelichtung leuchtet.

Bei den "Grundeinstellungen" wird am Regler für die "Belichtung" die Helligkeit reduziert, indem der Regler langsam nach links geschoben wird. Stetig beobachtet man den weissen Balken im JPG Histogramm. Die Helligkeit kann um einiges reduziert werden, ohne dass sich der Balken im JPG Histogramm nach links zu bewegen beginnt. Bei RAW Bildern der Nikon D810 beginnt sich der Balken erst bei einem Wert der Belichtung, von -2.50 nach links zu bewegen und die Überbelichtungsanzeige erlischt.

So soll dieser Blendenwert (Nikon D810 = 2.5) bei der eigenen Kamera ermittelt werden. Dies ist der Wert, um welchen die Bilder im RAW Format, laut JPG Histogramm, "überbelichtet" werden können.

Im Falle einer Nikon D810 kann man somit um 2.5 Blenden heller belichten, ohne Zeichnung durch Überbelichtung zu verlieren.
 (Dies immer bei der Grundempfindlichkeit der Kamera, z.B. Nikon 810 bei 64 ISO).
 Absolut fest damit verbunden ist natürlich, dass bei der Entwicklung in das 16 Bit TIF Format, die Belichtung mindestens um diesen Blendenwert (2.5) reduziert werden muss!
 Im Idealfall, wenn mit Sicherheit der hellste Bereich im Bild mit 2.5 Blenden heller belichtet wird, sinkt das Rauschen im Bild, im Vergleich zum "normal" belichteten Bild um 2.5 Blendenstufen.



Der Helligkeitsbalken zeigt die Helligkeit in Natura (Realität). Ist sie hell wie bei der hellsten Blende (mit 1 bezeichnet), dann kann sie mit guter Zeichnung im 12 Bit RAW Format mit 2048 Tonwertstufen und im 14 Bit RAW Format mit 8192 Tonwertstufen fotografiert werden. Beim Fotografieren im JPG Format kann erst eine Helligkeit, die um 2.5 Blenden dunkler auf den Foto-Chip auftritt, aufgenommen werden. Dies bei der hellsten JPG Blende mit nur 32 Tonwertstufen. Die "Anzahl Blenden" bezieht sich auf das Maximum der möglichen Blenden im Aufnahmeformat und nicht auf den maximalen Blendenumfang der Kamera!

Klar erkennbar ist hier der Vorteil des RAW Formates, gegenüber dem JPG Format. In der untersten Zeile "Speicherformat" sieht man, dass das TIF 16 Bit Format genügend Platz bietet, um RAW Bilder in vollem Umfang aufzunehmen, dies auch dann, wenn bei der Entwicklung in das 16Bit TIF Format zusätzlich aus Sicherheitsgründen, um eine weitere Blende dunkler abgespeichert wird.

Die Erfassung und Speicherung der Helligkeitswerte unterscheidet sich beim RAW Format zum JPG und TIF Format. Eine Blende dunkler wird im RAW Format mit einem halb so grossen Zahlenwert festgehalten. Dies bedeutet, dass der Umfang der hellsten Blende im RAW Format die Hälfte aller möglichen Zahlenwerte in Anspruch nimmt. Bei 14 Bit RAW, das gesamthaft je Farbe 16383 Helligkeitswerte (Zahlenwerte) beinhaltet, wird die Hälfte dieser möglichen Zahlenwerte für den Bereich der hellsten Blende benötigt. Jede weitere Reduzierung um eine Blende halbiert diesen Zahlenwert.

Zur Kamerainternen Technik und der Möglichkeit, die Empfindlichkeit (ISO) zu steigern: Auf dem Fotochip befinden sich lichtempfindliche Zellen. Diese Zellen können in ihrer Lichtempfindlichkeit nicht verändert werden!
 Jedoch kann ihr Signal (Volt), das in der Stärke abhängig vom auftreffenden Licht ist, verstärkt werden. Diese Verstärkung wird mit der eingestellten ISO Zahl geregelt. Je höher die eingestellte ISO Zahl ist, umso stärker wird das Signal der Fotozellen verstärkt. Jede Verstärkung ist mit Rauschen behaftet!

Bei erhöhter ISO Zahl, also stärkerer Verstärkung des Signales der Fozelle, kommt zum Grundrauschen der Fozelle noch das Rauschen der Verstärkung hinzu. Je höher die ISO Zahl, umso stärker wird das Rauschen sein.

Werden die Bilder im JPG 8 Bit Format abgespeichert und die Kamera besitzt im RAW Format einen höheren Dynamikumfang, kann bei der Erhöhung der ISO Zahl im JPG Format bei den unteren ISO Empfindlichkeiten auf eine Verstärkung des analogen Signales und dadurch zusätzlichem Rauschen durch analoge Verstärkung verzichtet werden. Es werden dann lediglich die digitalen Zahlenwerte um einen Faktor erhöht. Es tritt dann beim Erhöhen der ISO Zahl kein zusätzliches Rauschen durch analoge Verstärkung auf.

Dies ist jedoch nur in einem begrenzten Masse möglich. Bei starker Erhöhung der ISO Zahl muss ab einem gewissen Wert dennoch durch die analoge Verstärkung mit zusätzlichem Rauschen gerechnet werden.

Die Kamerahersteller verwenden dazu je nach Kameramodell unterschiedliche Techniken, die zum Teil nicht publik gemacht werden, sich aber im Rauschverhalten äussern.

Beim JPG und TIF Format wird für den Bereich der hellsten Blende nicht die Hälfte (50%) aller möglichen Zahlenwerte benötigt, sondern lediglich etwa 12.5%. Die nächste, zweite Blende nimmt etwa 17.3% der Zahlenwerte in Anspruch,

die Dritte 22.4%,

die Vierte 21.2%,

die Fünfte 13.3%,

die Sechste 7%,

die Siebte 3.5%,

die Achte 1.7%

die Neunte 0.8%

und der Bereich der 10. Blende besitzt etwa 0.4% aller möglichen Tonwertstufen.

Bei 256 (8 Bit) möglichen Tonwertstufen entspricht 0.4% noch einer einzigen Helligkeitsstufe.

Bei 65535 (16 Bit) möglichen Tonwertstufen entspricht die 10. Blende noch etwa 256 Tonwertstufen.

Die Entwicklung, Umwandlung des 14 Bit RAW Formates in das 16 Bit TIF Format.

Die Tabelle zeigt wie die Tonwertstufen im TIF Format übernommen werden, wenn nach JPG Histogramm zur Sicherheit mit einer halben Blendenstufe unterbelichtet wird, also das RAW Format 3 Blenden zu dunkel belichtet und bei der Entwicklung die Belichtung ohne Korrektur übernommen wird.

Blenden	RAW	TIF
	14 Bit minus 3 Blenden Aufnahmeformat	16 Bit Speicherformat
1	1024	8192
2	512	11520
3	256	14592
4	128	13824
5	64	8704
6	32	4352
7	16	2304
8	8	1024
9	4	512
10	2	256
11	1	128
12		64

Das 14 Bit RAW Format bietet im Bereich der vierthellsten Blende 1024 unterschiedliche Tonwertstufen. Diese werden im 16 Bit TIF Format in einem Bereich abgespeichert, der eigentlich 8192 Tonwertstufen zulassen würde.

Wird der Bereich des 14 Bit Raw Formates voll ausgeschöpft, indem nach JPG Histogramm um 2.5 Blenden heller belichtet wird, dann werden die Tonwertstufen folgendermassen im 16 Bit TIF Format übernommen. Vorausgesetzt, dass bei der Entwicklung mit vollem Erhalt der Zeichnung, die Belichtung (Helligkeit) um 2.5 Blenden reduziert wird.

Blenden	RAW	TIF
	14 Bit Aufnahmeformat	16 Bit Speicherformat
1	8192	8192
2	4096	11520
3	2048	14592
4	1024	13824
5	512	8704
6	256	4352
7	128	2304
8	64	1024
9	32	512
10	16	256
11	8	128
12	4	64
13	2	32
14	1	16

Hier wird ersichtlich, dass das 16 Bit TIF Format die vom 14 Bit RAW Format gelieferte Menge an Tonwerten im Bereich der hellsten Blende voll und ohne Verlust übernehmen kann. Bei den dunkleren Blendenbereichen bietet das 16 Bit TIF Format genügend Platz mit Reserve. Diese Reserve ist bei Tonwertänderungen bei der Bearbeitung von grossem Nutzen.

Der Rauschabstand ist bei richtig belichteten RAW Bildern (JPG Histogramm + 2.5 Blenden) sehr hoch. Bei der Entwicklung (Umwandlung) in das TIF Format bleibt dieser hohe Abstand erhalten, auch dann, wenn bei der Entwicklung die Belichtung nicht nur um 2.5 Blenden sondern noch um weitere Blenden abgedunkelt wird. So findet das beim Fotografieren voll ausgenutzte 14 Bit RAW Format, auch noch mit Erhalt aller Tonwerte im 16 Bit TIF Format Platz, wenn es bei der Entwicklung um 4 Blenden abgedunkelt wird.

Blenden	RAW	TIF
	14 Bit Aufnahmeformat	16 Bit Speicherformat
1		8192
2		11520
3		14592
4		13824
5	8192	8704
6	4096	4352
7	2048	2304
8	1024	1024
9	512	512
10	256	256
11	128	128
12	64	64
13	32	32
14	16	16
15	8	8
16	4	4
17	2	2
18	1	1

WICHTIG:

Alles erwähnte betreffend ETTR bezieht sich darauf, dass mit der Kamera mit ihrer Grundempfindlichkeit fotografiert wird (z.B. Nikon D810 mit 64 ISO)!

Test

Wird mit Zerene Stacker und Abspeichern im 16 Bit Format gestackt, kann man zum Test voll ausbelichtete 14 Bit RAW Einzelbilder bei der Entwicklung um (2.5 + 4) 6.5 Blenden abdunkeln und diese dunklen Bilder stacken. Zur Beurteilung hebt man dann das dunkle, resultierende Bild von Zerene Stacker, in der Helligkeit um 4 Blenden an. Dabei gehen keine Tonwerte verloren, es wird somit ersichtlich, dass das 16 Bit TIF Format genügend Reserve an Tonwerten aufweist.

In der Praxis muss man es nicht übertreiben, doch dieser Test zeigt, dass ein Abdunkeln der Bilddatei, bei der Umwandlung von RAW zu 16 Bit TIF um einige Blenden mehr als 2.5, keinen Verlust an Tonwerten bringt. Es ist somit dadurch auch garantiert, dass das Hochschaukeln der hellen Bereiche im Bild durch das Stacken, im resultierenden Stack verhindert werden kann und somit nicht zur Überbelichtung führt.

Wird der gesamt mögliche Bereich nach oben (hell) im RAW Format nicht ausgenutzt und entsprechend dem JPG Histogramm mit einer halben Blende zur Sicherheit unterbelichtet, also im RAW Format somit um 3 Blenden unterbelichtet, was viele Fotografen so machen,

dann werden $(50 + 25 + 12.5)$ 87.5% der zur Verfügung stehenden Tonwerte nicht genutzt, was nicht dem Sinn des RAW Formates entspricht.

Will man nun mit RAW optimal nach rechts (ETTR) belichten, benötigt man ein Histogramm bei dem die Werte der X-Achse gespreizt werden können und die Skala der Y-Achse logarithmisch ist.

Damit werden auch wenige Pixel im sehr hellen Bereich gut sichtbar angezeigt. (z.B. mit dem Programm RawDigger).

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Programme am Computer laufen und ihr Histogramm nicht direkt in der Kamera betrachtet werden kann.

Für Focus Stacking im Studio ist dies kein Problem.

Ein Problem kann aber sein, dass die Bedienung des Programmes nicht sehr einfach ist und man etwas geübt sein muss, um die Einstellungen richtig zu wählen und das Histogramm entsprechend gut beurteilen zu können.

Im Allgemeinen belichte ich 1 Blende unter dem Maximum des RAW Histogramms, also 1.5 Blenden heller als das JPG Histogramm anzeigt.

Da beim Focus-Stacking die hellsten Lichtwerte im Bild nicht immer leicht zu finden sind, vermindere ich die Helligkeit bei der Umwandlung von RAW zu 16 Bit TIF, um drei Blenden. Dabei wird ebenfalls das Rauschen geringer, der Rauschabstand bleibt gleich gross.

Danach werden diese etwas dunklen Bilder gestackt und im 16 BIT TIF Format abgespeichert.

Die ganze nachträgliche Bearbeitung der Bilder findet dann im 16 Bit TIF Format statt. Das Resultat sind wenig verrauschte, helle und freundliche Bilder, die auch noch in sehr hellen Bereichen eine gut erkennbare Zeichnung aufweisen.

Kurzform:

Voraussetzung:

Es wird im 14 Bit RAW Format mit der Grundempfindlichkeit (ISO) der Kamera fotografiert. Entsprechend dem JPG Histogramm um 1.5 Blenden überbelichtet, somit besteht eine Blende Sicherheitsabstand zur Überbelichtung.

Bei der Entwicklung vom 14 Bit RAW zum 16 Bit TIF Format, um 3 Blenden abgedunkelt. Daraus resultieren rauscharme Stacks, mit einer für die Bearbeitung genügend hohen Anzahl von Tonwerten.

Warum ist der obere Helligkeitsbereich des JPG Formates nicht mit dem Helligkeitsbereich des RAW Formates gleichgesetzt, das wäre doch einfacher? Dazu gibt es mehrere Antworten:

1. Die Lichtempfindlichkeit des JPG Formates und auch des TIF Formates, sofern mit der Kamera damit fotografiert werden kann, richtet sich nach der Empfindlichkeit der Filmmaterialien der analogen Zeit der Fotografie und somit auch an alle fotografischen Messgeräte aus der analogen Zeit. Als Beispiel seien hier die Belichtungsmesser genannt. Diese Norm sagt in etwa aus, dass bei einer Lichtempfindlichkeit von 100 ISO des Filmmaterials, Blende 8 und einer Belichtungszeit von 1/125 Sekunden, "ein absolut weisses Blatt" das Maximum an Schwärzung des Negativ-Filmmaterials erreicht, wenn die Helligkeit in Realität einen Lichtwert (LW) von 13 besitzt.

So ist es auch in der digitalen Fotografie. Fotografiert man bei der gleichen Helligkeit (LW 13) wie oben erwähnt ein weisses Blatt mit 100 ISO, Blende 8 und belichtet 1/125 Sekunde, dann erreicht man im JPG oder TIF Format die maximale Helligkeit, die im JPG

Format mit 255 abgespeichert wird (natürlich Binär als 11111111). Moderne digitale Kameras können aber auch eine höhere Helligkeit auf dem Chip mit sauberen Tonwertstufen erfassen! Diese zeichnet das ungenormte RAW Format auf und dieses ist von Kamera zu Kamera unterschiedlich.

2. Wäre das JPG im Fotoapparat in der maximalen Helligkeit gleichgesetzt mit der maximalen Helligkeit, die der Foto-Chip und das RAW Format erfassen und aufzeichnen kann, dann bräuchte es zur Belichtung im JPG Format viel mehr Licht, oder eine längere Belichtungszeit, höhere ISO Zahl oder eine grösser geöffnete Blende.

2. Die Anzahl der Tonwertstufen innerhalb der einzelnen Blendenbereiche im JPG Format, finden auch noch gut im unteren Helligkeitsbereich des Foto-Chips Platz, wenn die maximale Helligkeit des JPG Formates um 5 Blenden unter dem maximalen Wert der möglichen Helligkeit des Foto-Chip liegt (Nikon D810). Somit können auch mit wenig Licht alle Helligkeitsstufen des JPG Formates bestens genutzt werden.

WICHTIG:

Alles was ich hier " JPG oder RAW zu TIF, Belichtung (ETTR) und Histogramm" beschrieben habe, bezieht sich auf eigene Messungen, die ich mit einer Nikon D810 anfertigte. Diese Daten besitzen keine allgemein gültige Richtigkeit!

Sie dienen lediglich dazu, den Unterschied und die Eigenheiten von RAW, JPG und TIF zu umschreiben.

Jeder Fotograf, der an diesen Zusammenhängen interessiert ist, kann mit seiner Kamera eigene Messungen anfertigen, die dann für ihn und seine Kamera eine höhere Genauigkeit und Wahrheit besitzen.

Zu beachten bei Focus-Stacking ist, dass der hellste Bereich in einem Bild in seiner Helligkeit nur richtig beurteilt werden kann, wenn dieser hellste Bereich im Fokus ist. Das kann bei Focus-Stacking schwierig sein, da der hellste Bereich zur Beurteilung nicht immer einfach in der Serie der Einzelbilder zu finden ist.

Deshalb sollte zur Sicherheit etwa eine Blende unterbelichtet werden.

Zur Literatur empfehle ich die WebSite von Dr. J. Schuhmacher, im Speziellen zum Thema RAW und JPEG Format:

<http://www.foto-schuhmacher.de/artikel/software/raw-und-jpeg.html>

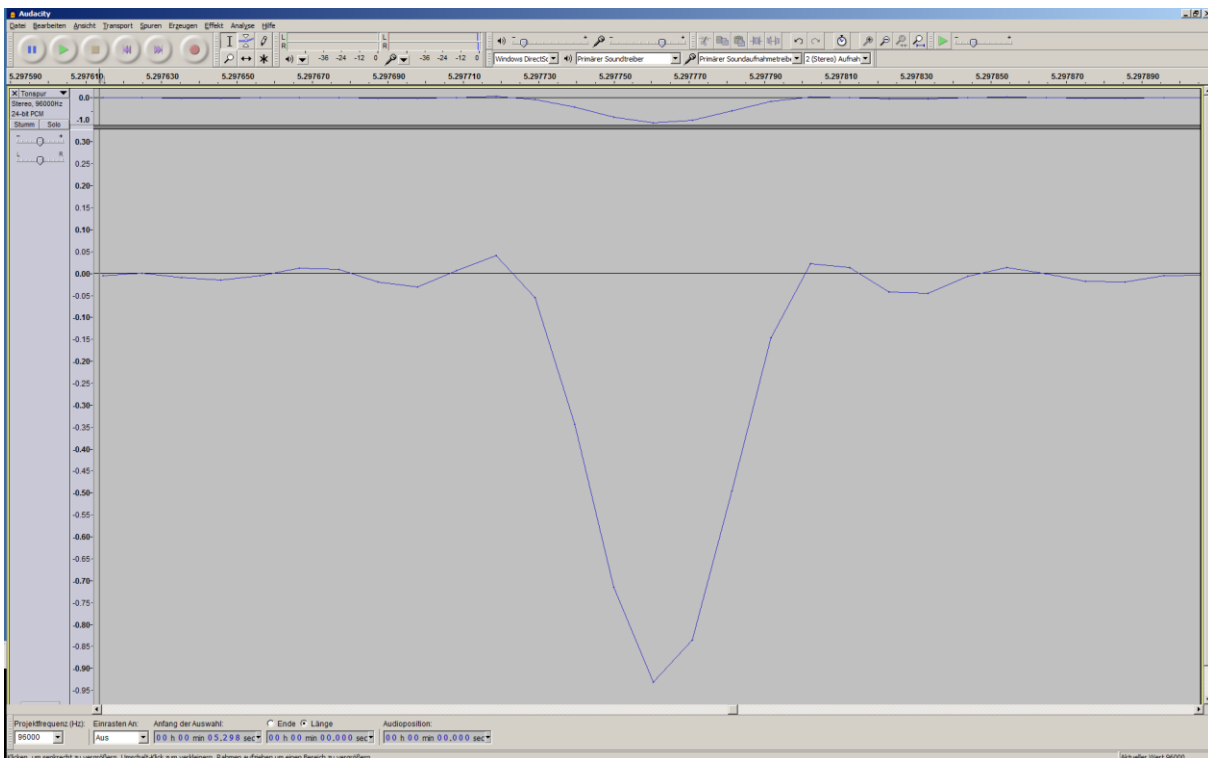
Sehr gut wird hier auch gezeigt, was Glaube, Annahme und Wissen zu diesem Thema sind.

Blitz-Abbrennzeit, Verwendung mehrerer Blitzgeräte

Ist man bestrebt, eine Verwischung und somit eine Auflösungsminde rung durch Bewegung des Objektes zur Kamera während der Belichtungszeit zu vermeiden, dann ist der Gebrauch von Blitzgeräten dienlich. Reduziert man die Blitzleistung, dann ist die Blitzabbrennzeit kürzer.

Bei den folgenden Kurven war die Einstellung aller Blitzgeräte immer auf 1/128 Leistung. Die Abbrennzeit wird als $t_{0.5}$ angegeben, es ist dies die Zeit zwischen Erreichen der halben maximalen Lichtstärke bis zum Absinken zur halben maximalen Lichtstärke.

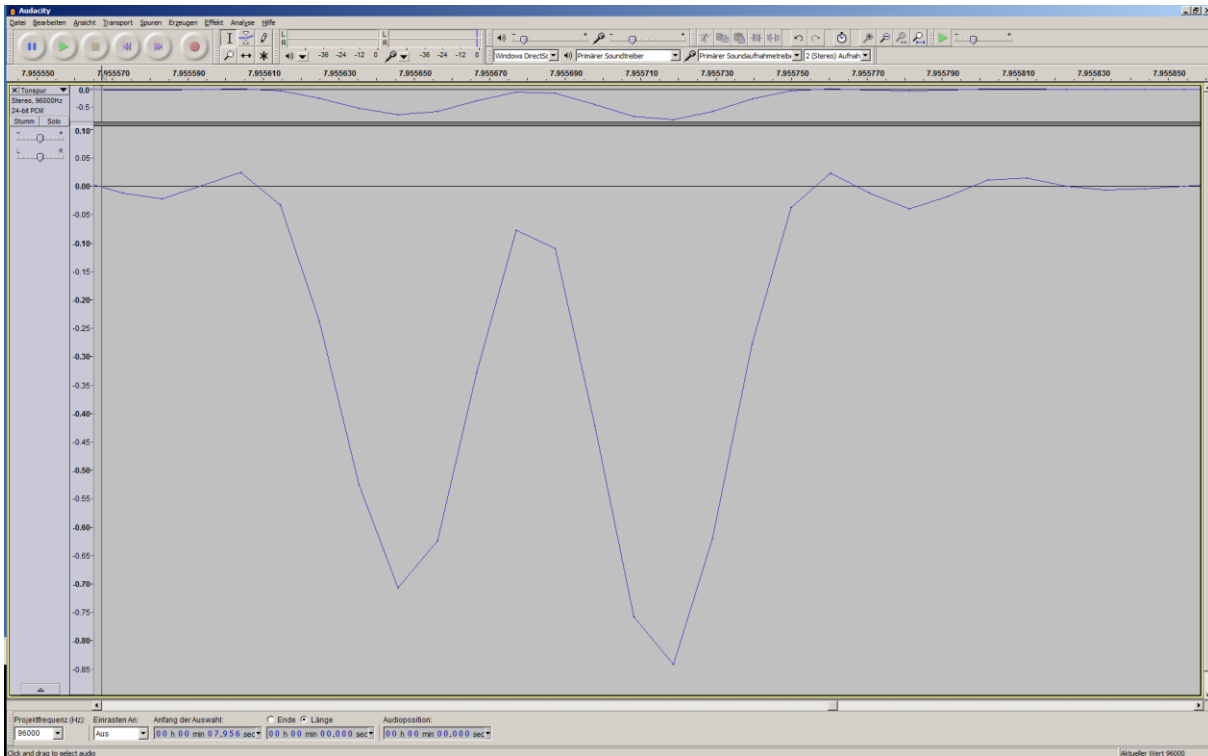
Die Abbrennzeit beim YONGNUO YN560-III beträgt bei 1/128 Leistung $t_{0.5} = 1/25'640$ sek. (Kurve A).



Kurve A

1 Blitz YONGNUO YN560-III, $t_{0.5} = 1/25'640$ sek.

Löst man mit einem Blitzgerät, das an der Kamera angeschlossen ist (Master), ein zweites Blitzgerät aus (Slave) und beide Blitzgeräte beleuchten das Objekt, dann erhält man bedingt durch die Auslöseverzögerung ($1/13'300$ sek.) des zweiten Blitzgerätes zwei nacheinander folgende Blitze, die somit die Belichtungszeit auf $t_{0.5} = 1/10'000$ sek. erhöhen (Kurve B).



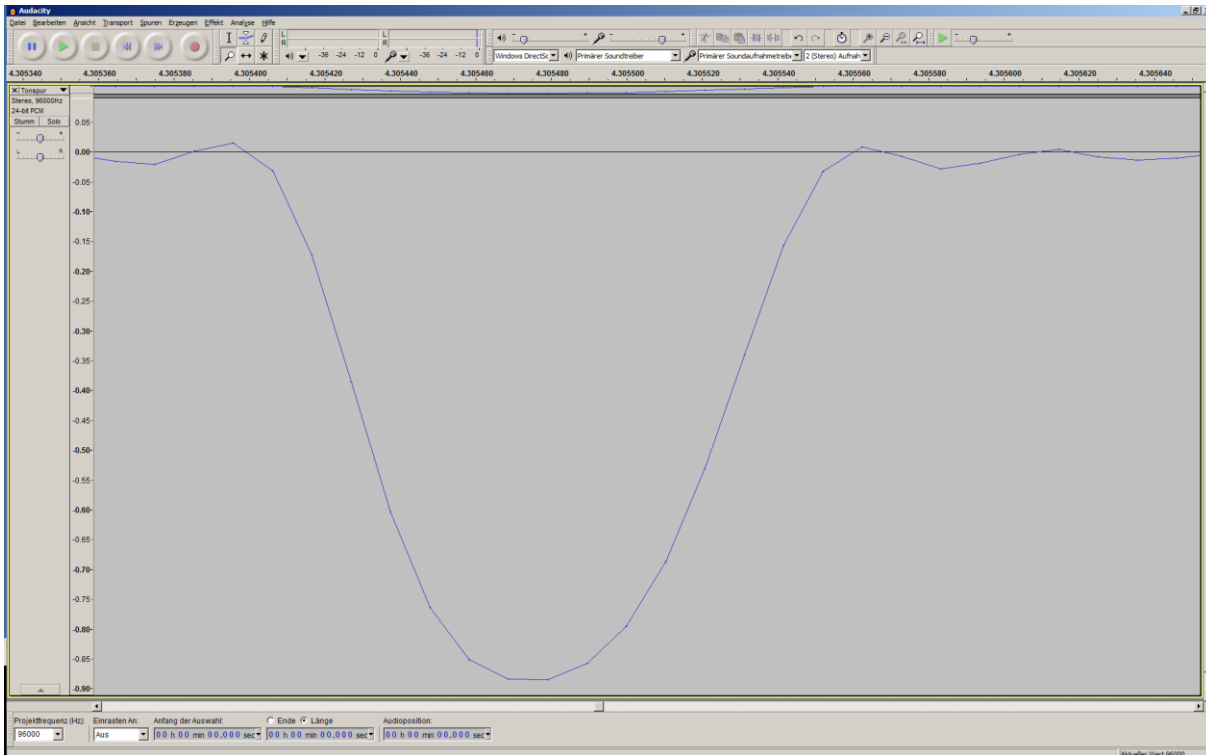
Kurve B

Master: 1. Blitz YONGNUO YN560-III,

Slave: 2. Blitz YONGNUO YN560-III,

Der Slave löst mit einer Verzögerung von $1/13'300$ sek. aus, die gesamte Blitzzeit beträgt $t_{0.5} = 1/10'000$ sek.

Verwendet man unterschiedliche Blitzgeräte-Marken und -Modelle, dann ist ein gleichzeitiges Abbrennen der Blitze nicht gewährleistet. In der folgenden Kurve wurde zum Aufbau der Kurve B noch ein Blitzgerät NIKON Speedlight SB-900 als Slave dazugefügt. Da dieses Nikon Blitzgerät eine kürzere Auslöseverzögerung hat als das YOUNGDUO, kommt sein Blitzlicht zwischen die beiden YONGNUO (Master und Slave) zu stehen. Die gesamte Blitzabbrennzeit verlängert sich dadurch nicht und bleibt bei $t_{0.5} = 1/10'000$ sek. (Kurve C)



Kurve C)

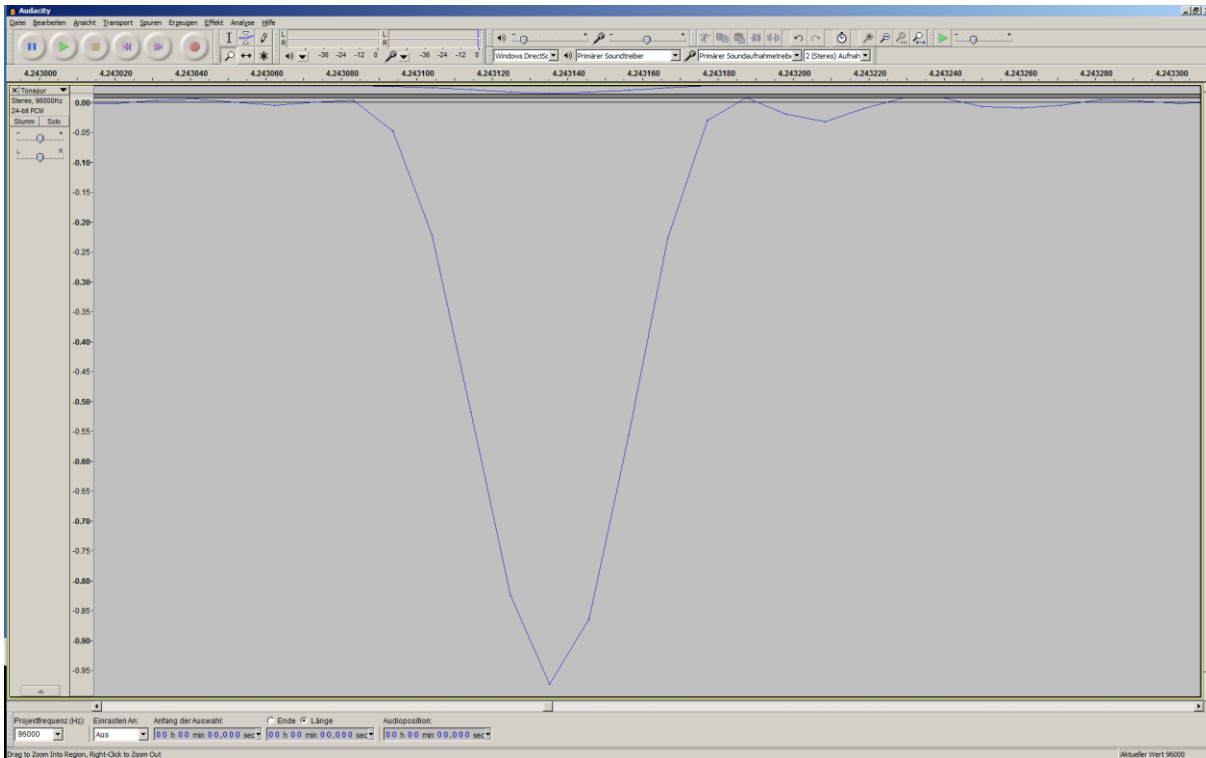
Master: 1. Blitz YONGNUO YN560-III,

Slave: Der NIKON Speedlight SB-900 Blitz hat eine kürzere Auslöseverzögerung als der YOUNGDUO und platziert sich somit an 2. Stelle zwischen den YOUNGDUO Master und den YONGNUO YN560-III Slave.

Slave: 3. Blitz YONGNUO YN560-III

Die gesamte Blitzabbrennzeit beträgt $t_{0.5} = 1/10'000$ sek.

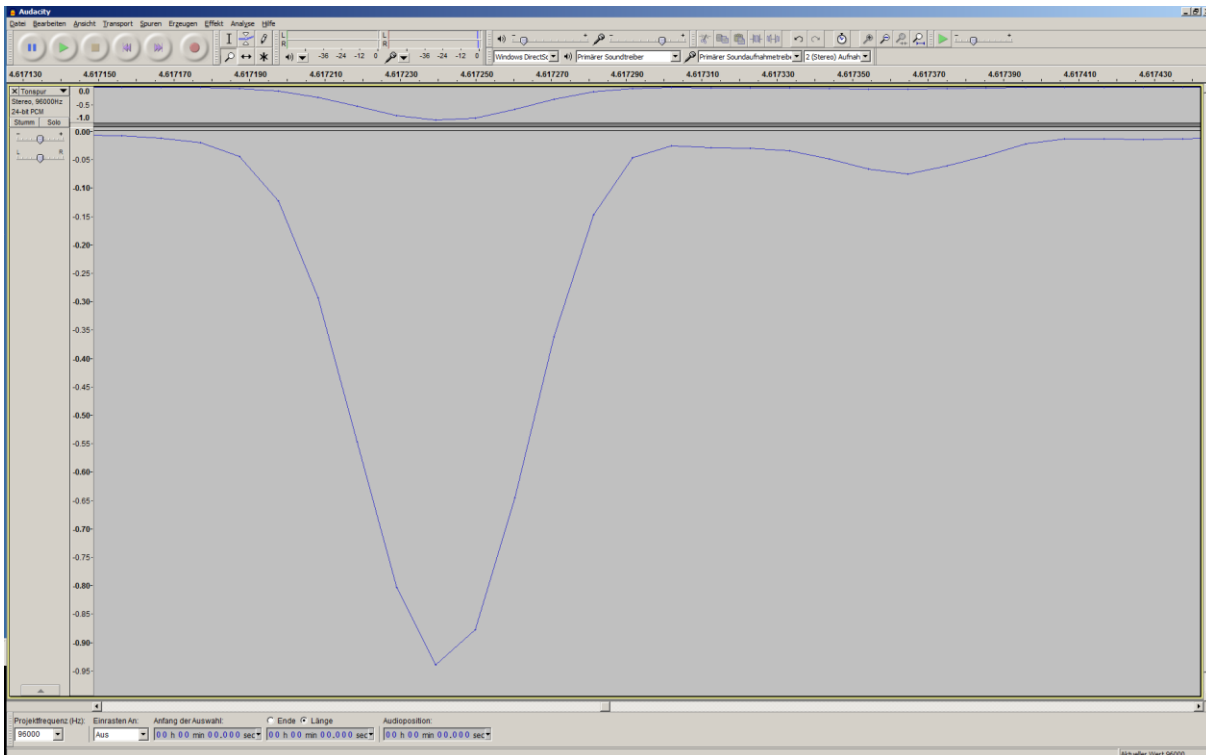
Kurve D zeigt den Verlauf beim NIKON Speedlight SB-900, $t_{0.5} = 1/22'200$ sek.



Kurve D

Master nicht an der Beleuchtung beteiligt, somit hier nicht sichtbar,
Slave NIKON Speedlight SB-900, $t_{0.5} = 1/22'200$ sek.

Kurve E zeigt den Verlauf wenn gleichzeitig zwei unterschiedliche Modelle des gleichen Herstellers verwendet werden, NIKON Speedlight SB-900 und NIKON Speedlight SB 800. Die Auslöseverzögerung ist unterschiedlich und somit ergibt sich eine längere Blitzzeit, sie steigt von $t_{0.5} = 1/22'200$ sek. auf $t_{0.5} = 1/19'000$ sek.



Kurve E

Master nicht an der Beleuchtung beteiligt, somit hier nicht sichtbar,

Slave 1: NIKON Speedlight SB-900

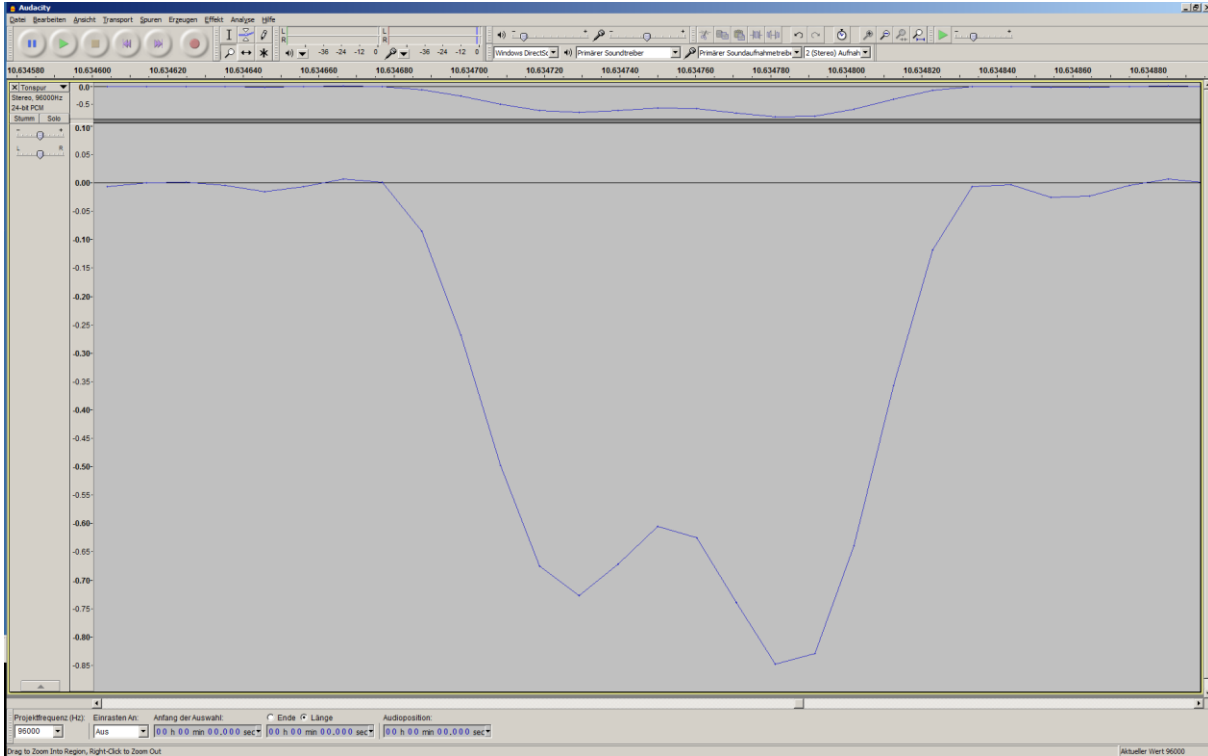
Slave 2: NIKON Speedlight SB-800,

$t_{0.5} = 1/19'000$ sek.

Kurve F zeigt nun, wie lange die Blitzzeit wird, wenn der Master und unterschiedliche Slave-Blitzgeräte verwendet werden. Die Blitzzeit steigt auf über das Doppelte an.

Vergleich:

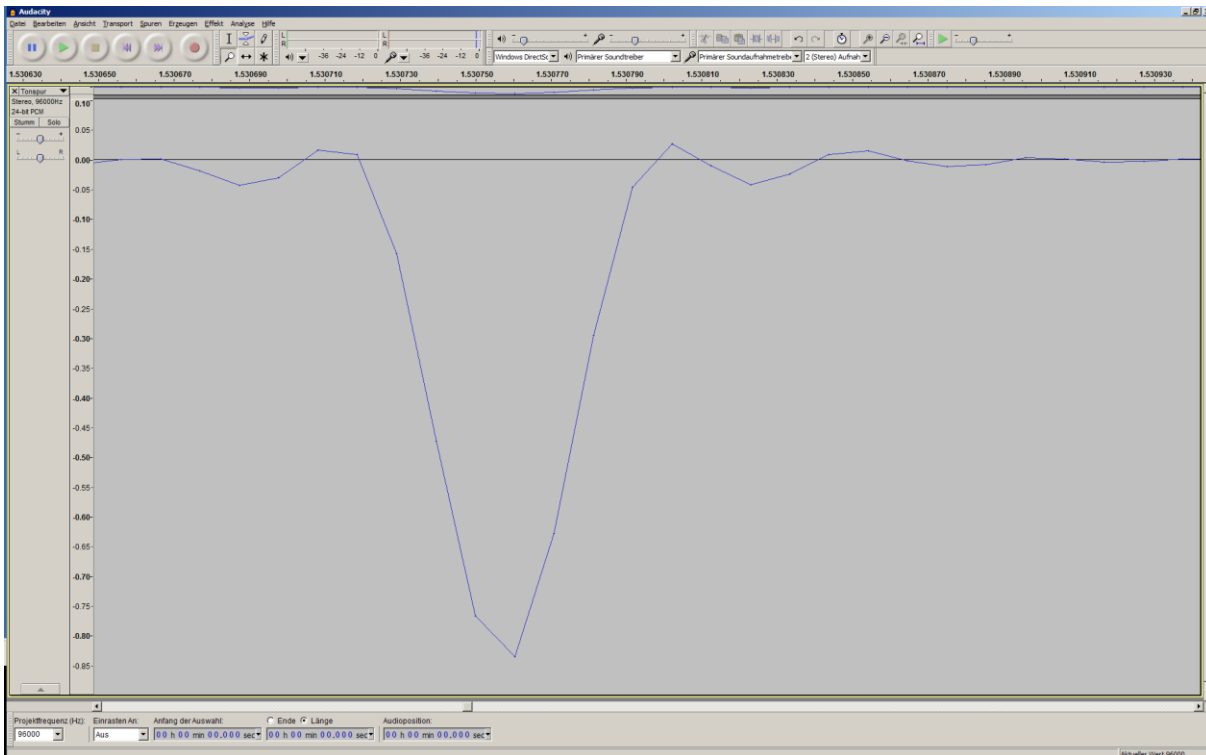
YONGNUO YN560-III, $t_{0.5} = 1/25'640$ sek. (Kurve A) als Master und unterschiedliche Blitzgeräte, $t_{0.5} = 1/9'500$ sek. (Kurve F)



Kurve F

Master: YONGNUO YN560-III,
 Slave 1: NIKON Speedlight SB-900
 Slave 2: YONGNUO YN560-III
 Slave 3: NIKON Speedlight SB-800
 $t_{0.5} = 1/9'500$ sek.

Die Helligkeit eines Blitzgerätes reicht für die Beleuchtung oft nicht aus, es müssen mehrere Blitzgeräte synchron ihre Blitze abgeben. Löst man z.B. 4 Stück YONGNUO YN560-III Blitzgeräte mit einem Blitzgerät aus das an der Beleuchtung des Objektes nicht beteiligt ist, beträgt die Abbrennzeit $t_{0.5} = 1/23'800$ sek. (Kurve G).



Kurve G

Master nicht an der Beleuchtung beteiligt, somit hier nicht sichtbar

Slave: 3 Blitzgeräte YONGNUO YN560-III,
 $t_{0.5} = 1/23'800$ sek.

Die Lösung die in Kurve G gezeigt wird, ist die empfehlenswerteste Variante, denn nur so bleibt die kurze Blitzzeit erhalten und die Verwischung durch Bewegung kann minimiert werden.



Hier stehen 4 Blitzgeräte, die das Objekt beleuchten auf einer durchsichtigen Platte, die vom StackShot beim Stacken angehoben wird.

Objekt und Blitzgeräte werden von Bild zu Bild gemeinsam angehoben.

Die 4 Blitzgeräte mit Einstellung "S1" werden vom unten liegenden Blitzgerät, das nicht an der Beleuchtung des Objektes beteiligt ist, ausgelöst

Farbmanagement

Im Bereich der Makro- und Mikrofotografie erachte ich die natürliche Farbwiedergabe nicht als vordringlichste Pflicht. Sowohl die Farben als auch deren Kontrast kann dem künstlerischen Bildeindruck angepasst werden.

Von Interesse ist jedoch, dass ein festgelegter Farbeindruck nach der Bearbeitung mit Software am Monitor und bei Ausdrucken erhalten bleibt. Um dies einfach zu gewährleisten, empfiehlt sich der Gebrauch eines klar definierten Farbraumes.

Der RGB-Farbraum ist der am häufigsten vertretene Farbraum bei Kameras, Monitoren und Druckern.

Wichtig dabei ist zu wissen, dass im RGB Farbraum eine Farbe mit drei Zahlenwerten (bei 8 Bit, von 0 bis 255) definiert ist und zwar bezogen auf das jeweilige Gerät.

R steht für Rot, G für Grün und B für Blau. Der Zahlenwert 0/255/0 bedeutet, dass das Gerät kein Rot und kein Blau zeigt und beim Grün das Maximum.

Das Maximum an Grün sieht jedoch bei jedem Gerät unterschiedlich aus, somit ist das von der Kamera gespeicherte Grün (0/255/0) nicht identisch mit dem Grün (0/255/0) des Monitors oder dem des Druckers.

Hier schafft der Farbraum Adobe-RGB Abhilfe (ebenfalls der sRGB Farbraum), denn bei ihm sind die Farben absolut definiert, also im optischen Eindruck immer gleich. So kann ein Wert im sRGB Farbraum von 0/255/0 im Adobe-RGB Farbraum den Werten 1/245/2 entsprechen, um den gleichen Farbeindruck zu erhalten. Der Adobe-RGB Farbraum steht bei den meisten Kameras, Monitoren und Druckern zur Verfügung. Verwendet man durchgehend (Kamera, Monitor, Softwarebearbeitung, Drucker) den Adobe-RGB Farbraum, hat man die Gewissheit, dass die Farben erhalten bleiben und der Farbeindruck in etwa immer gleich ist.

Erfolgt für die Präsentation im Internet eine Umwandlung vom TIF Format (16Bit) in das JPG Format (8Bit) mit dem sRGB farbraum, gehen Farben verloren und verbleibende können sich etwas verändern. Es muss somit die Farbstimmung kontrolliert und eventuell angepasst werden.

Am einfachsten ist es, schon bei der Umwandlung vom RAW Format in das 16 bit TIF Format den sRGB Farbraum (IEC 6 1966-2.1) zu wählen und den Farbraum der Bearbeitungssoftware ebenfalls auf diesen sRGB einzustellen.

Mit dieser Einstellung des Farbraumes ergeben sich die geringsten Farbabweichungen beim Vergleich von Monitor, Ausdruck und Darstellung im Internet.

Freier Arbeitsabstand und Objektivform.

In der Makro- und vor allem in der Mikrofotografie kann der freie Arbeitsabstand am Objektiv nicht frei gewählt werden. Mikroskopobjektive besitzen einen festen freien Arbeitsabstand, der weitgehend von der Blende (Apertur) abhängig ist. Üblicherweise wird der freie Arbeitsabstand bei stärkerer Vergrößerung kürzer.

Bei Mikroskopobjektiven steigt deren Auflösung, je höher die Apertur ist. Auch bei Objektiven die gleich stark vergrössern, ist im Allgemeinen die Auflösung bei höherer Apertur höher.

Oft weisen Mikroskopobjektive die für Auflicht gerechnet sind, einen höheren freien Arbeitsabstand bei etwas reduzierter Auflösung auf und das Objekt lässt sich dadurch besser beleuchten. Je höher der freie Arbeitsabstand ist, umso besser lässt sich beleuchten, ebenfalls kann auch eine schlanke Form mit kleinem Durchmesser des Objektivgehäuses (Fassung) eine gute Beleuchtung begünstigen.

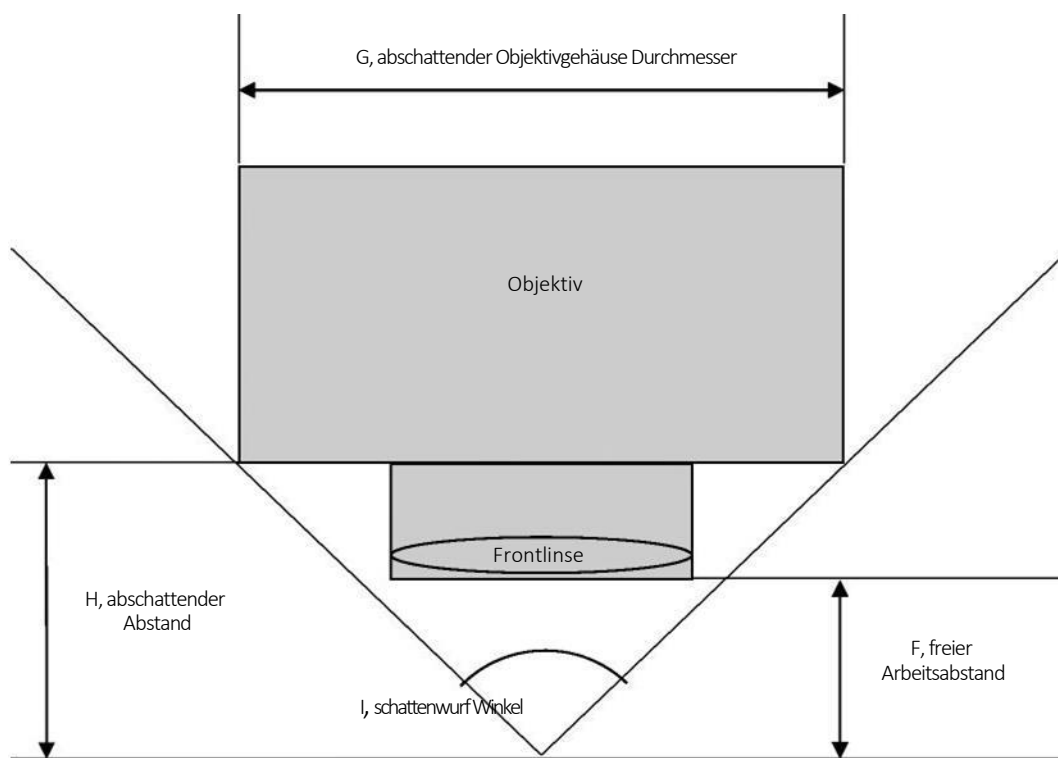
Als Beispiel vergleiche ich das Lupenobjektiv Zeiss Luminar 16mm 1:2.5/A0.2 mit dem Mikroskopobjektiv Reichert 10/0.25 160/-.

Das Luminar 16mm besitzt eine Fassung, die an der Objektivfront einen Durchmesser von **24mm** besitzt. Der freie Arbeitsabstand beträgt bei 10:1 etwa 10 mm.

Das Reichert 10/0.25 dessen Fassung zugespitzt ist, besitzt an der Objektivfront einen Durchmesser von nur **8mm** und bei 10:1 einen freien Arbeitsabstand von 7mm. Der Schattenwurf des Luminar 16mm ist somit durch seinen grossen Durchmesser entsprechend gross und es lässt sich deshalb mit dem Reichert 10/0.25 besser beleuchten. Ebenfalls zeichnet das Reichert (kürzerer freier Arbeitsabstand) mit einer Apertur von 0.25 detailreicher als das Luminar 16mm, das eine Apertur von 0.2 besitzt.

Der Abschattungswinkel lässt sich mit Excel folgendermassen berechnen.

$$=ARCTAN(((\text{Objektiv Durchmesser}/2)/\text{Distanz zu Abschattungsdurchmesser}))*180/PI()*2$$



Zwischenringe und Balgen

Zwischenringe sind "Distanzrohre" mit Kamera und Objektivanschluss, die es in unterschiedlicher Länge, meistens auch als Dreier-Set gibt. Sie können einzeln und in unterschiedlicher Kombination zwischen Objektiv und Kamera angebracht werden.

Der Balgen ist in seiner Länge stufenlos ausziehbar.

Zwischenringe besitzen keine Optik und sind somit in ihrer optischen Funktion mit dem Balgen vergleichbar. Je länger sie sind, sich der Auszug verlängert und somit die Distanz zwischen Kamerachip und Objektiv sich erhöht, umso grösser wird die Projektion des Bildes auf dem Chip.

Wird der Auszug um den Wert der Brennweite des Objektivs erhöht, dann erhöht sich der Abbildungsmassstab um 1 (z.B. von 2:1 auf 3:1, oder von 4:1 auf 5:1). Umgekehrt kann so auch die Brennweite eines Objektivs gemessen werden. Die benötigte zusätzliche Verlängerung des Auszuges, um von 2:1 auf 3:1 zu gelangen, entspricht der Brennweite des Objektivs. Diese ist identisch mit der zusätzlich benötigten Auszuglänge, die von 3:1 auf 4:1 nötig ist.

Bildrand-Abbildungsfehler des Objektivs werden dadurch, je stärker vergrössert wird, nicht mehr auf dem Chip abgebildet. Es wird somit auf dem Chip der qualitativ beste Zentrumsbereich des Objektivs abgebildet.

Das Killerkriterium ist die Auflösung!

Wird bei hochauflösenden Kameras mit demselben Objektiv höher vergrössert, bleibt die Auflösung konstant. Löst das Objektiv höher auf als die Kamera, dann tritt beim Erhöhen der Vergrösserung bis zum Punkt der gleichen Auflösung (Kamera und Objektiv) eine Erhöhung der Auflösung des Bildes ein.

Die Verwendung von Zwischenringen und Balgen machen mit Fotoobjektiven also nur bedingt Sinn. Bis zu einem Abbildungsmassstab von 1:1 sind Foto-Makroobjektive ohne Zwischenringe und Balgen die beste Lösung. Von 1:1 bis 3:1 liefern gute Foto- und Makroobjektive mit fester Brennweite und Vergrösserungsobjektive an Zwischenringen und Balgen eine sehr gute Abbildungsqualität bei hoher Auflösung.

Bei Lupen-, Vergrösserungs- und Mikroskopobjektiven werden Zwischenringe und Balgen benötigt, damit sie entsprechend ihrer Spezifikation eingesetzt werden können.

Retro- und Tandemstellung von Fotoobjektiven

Grundsätzlich muss man sich bewusst sein, dass die Retrostellung von Fotoobjektiven oft eine Notlösung ist und nicht die gleiche Abbildungsqualität eines Lupenobjektives bietet. Lupenobjektive sind echte Retroobjektive. Die Retrostellung alleine reicht nicht aus, sondern alle Eigenschaften dieser Lupenobjektive sind für die Retrostellung optimiert, was bei Fotoobjektiven die in Retro montiert werden, nicht der Fall ist! Es ist also nicht damit getan, dass man ein Objektiv umgekehrt montiert.

Schon alleine die Grösse der Fassung der Objektive, also das Gehäuse, unterscheidet sich bei Lupenobjektiven von den Fotoobjektiven erheblich.

Das NIKKOR 24mm, 1:2.8 weist in Retro die höchste Auflösung bei Blende 4 auf. Der Durchmesser der Blende 4 bei einem 24mm Objektiv beträgt 6mm ($24\text{mm} / 4$). Da die maximale Blende des NIKKOR 24mm, 1:2.8 die Blende 2.8 ist, sie hat einen Durchmesser von 8.6mm ($24 / 2.8$), besitzt das Objektiv durch die Fassung einen unnütz störend höheren Durchmesser.

Luminar 40mm Objektiv, Durchmesser = 24mm,
 NIKKOR 24mm, 1:2.8 Objektiv, Durchmesser = 64mm.

Der grössere Durchmesser reduziert die Möglichkeit einer guten Beleuchtung.

Setzt man das 24mm, NIKKOR 24mm in Retro direkt an die Kamera, erreicht man einen Abbildungsmassstab von etwa 2.5:1 mit einer akzeptablen Auflösung in der Bildmitte (in etwa gleichwertig mit einem 105mm Objektiv mit Zwischenringen), jedoch mit einem starken Auflösungsabfall zum Rand, somit nicht empfehlenswert. Ein 105mm Makroobjektiv mit Zwischenringen hat bei 2.5:1 keinen Auflösungsabfall zum Rand!

Verwendet man am NIKKOR 24mm in Retro Zwischenringe von etwa 7cm, erreicht man einen Abbildungsmassstab von etwa 4:1.

Die Auflösung bei 4:1 beträgt beim NIKKOR 24mm, 1:2.8 in Retro in der Bildmitte etwa 280LP/mm.

Das Luminar 40mm löst bei 4:1 mit 340LP/mm auf, also etwa 20% höher.

Zum Rand sinkt die Auflösung beim NIKKOR 24mm, 1:2.8 in Retro auf 70%, das Luminar 40mm zeigt zum Rand hin keinen nennenswerten Auflösungsverlust!

Im Randbereich hat somit das NIKKOR 24mm, 1:2.8 in Retro eine Auflösung, die um 40% geringer ist als beim Luminar 40mm.

Ein Objektiv zeigt seine beste Abbildungsleistung, wenn es exakt nach Spezifikation eingesetzt wird.

Dreht man nun ein 24mm Fotoobjektiv, das im Normalfall eine grosse Breite der Realität auf den Chip verkleinert um, dann wird eine kleine Breite der Realität auf den Fotochip vergrössert. Manchmal geht das gut und die Abbildungsleistung ist befriedigend. Daraus kann aber nicht gefolgert werden, dass die Retrostellung allgemein optimal ist. Auch dann nicht, wenn Objektive, was selten der Fall ist, eine optisch symmetrische Konstruktion aufweisen und somit die Linsenfolge und Linseneigenschaften, von beiden Seiten gesehen, in der Abfolge gleich sind. Wenn ich im Folgenden von Blenden schreibe, meine ich nicht die Blende, die zur Lichtreduktion dient und dadurch die Schärfentiefe erhöhen, sondern ich schreibe von Blenden die sich ausserhalb des Strahlenganges befinden. Also von schwarzen Blenden und Einrichtungen die streu- und vagabundierendes Licht im Objektiv abfangen und somit eine flauere Abbildung verhindern, also alles im Interesse eines kontrastreichen und knackigen Bildes. Diese Einrichtungen so berechnet, dass das Licht von einer bestimmten Seite in das Objektiv eintritt. Tritt nun durch die Retrostellung das Licht aus der anderen Richtung in das Objektiv (Linsenkombination), dann kann es möglich sein, dass diese Blenden ihre Wirksamkeit verlieren und dadurch die Abbildung, flauer wird.

Es gibt Objektive, die von Grund auf in Retro sind, z.B. die Luminare. Je kürzer die Brennweite, umso stärker die Vergrößerung, also genau umgekehrt wie bei normalen Fotoobjektiven. Würde man ein Luminar 25mm Objektiv in Retro an der Kamera montieren, dann wäre die Umkehrung (Retro Stellung) wieder umgekehrt (also normal) und es wäre ein Weitwinkelobjektiv.

Oft werden in der Makrofotografie Vergrößerungsobjektive eingesetzt. Um diese Objektive nach Spezifikation zu verwenden, also beste Abbildungsleistung, müssen sie, wenn sie als Fotoobjektiv verwendet werden, umgekehrt an der Fotokamera montiert werden. Mechanisch ist es dann in Retro, optisch in Normalstellung. Bei einem Vergrößerungsgerät geht das Licht vom Gerät durch das Objektiv hinaus, zum zu belichtenden Fotopapier. Beim Fotoapparat ist es umgekehrt, da geht das Licht durch das Objektiv in das Gerät hinein und belichtet den Film/Chip.

Verwendet man nun ein Vergrößerungsobjektiv und möchte in den Genuss seiner guten Abbildungsleistung kommen, dann lässt man das Licht in der gleichen Richtung durch das Objektiv. Somit muss ein Vergrößerungsobjektiv beim Fotografieren umgekehrt auf der Fotokamera montiert werden.

Um bei den Blenden zu bleiben, die das Streu- oder/und vagabundierende Licht dämpfen und abfangen, noch ein weiteres Beispiel.

Flaue Bilder entstehen bei der Makrofotografie oft auch deshalb, weil ungeeignete billige Zwischenringe verwendet werden. Eine Verlängerung zwischen Optik und Kamerachip kann ihre Tücken haben, vor allem dann, wenn sie eng und innen nicht genügend matt sind. Die an die Innenwand auftreffenden Lichtstrahlen werden reflektiert und gelangen als Streu- oder/und vagabundierendes Licht zum Kamera-Chip, die Folge sind flaue und kontrastarme Bilder. Ein grosser Balgen mit seinem gefalteten Papier/Stoff verhindert besser, dass Streulicht weder zum Chip, noch zurück zum Objektiv gelangt. Es kann deshalb sein, dass Bilder die mit einem Balgen angefertigt wurden, klarer und kontrastreicher sind, als solche die mit billigen Zwischenringen hergestellt wurden.

Bei der Tandemstellung wird z.B. auf ein normal montiertes 100mm Objektiv mit einem Adapter (Filtergewinde zu Filtergewinde) ein 24mm Objektiv in Retro montiert. Dies ergibt einen Abbildungsmassstab von $(100\text{mm} / 24\text{mm} = 4,2)$ etwa 4:1.

Die Auflösung in der Bildmitte dieser Kombination ist 20% geringer als beim Luminar 40mm und in den Ecken sinkt sie noch einmal um etwa 30%.

Der freie Arbeitsabstand ist etwa doppelt so hoch wie beim Luminar 40mm, also etwa 40mm.

Die Tandemlösung bringt in etwa die gleiche Leistung, wie wenn das 24mm Objektiv alleine in Retro verwendet wird, also keinen Vorteil.

Ein geschultes Auge sieht bei Vergleichen, wenn die Auflösung um 10% reduziert wird, bei 20% Reduzierung der Auflösung sieht dies auch ein ungeschultes Auge gut.

Mangelt es an einem passenden Objektiv mit gewünschter Vergrößerung, dann kann ein Fotoobjektiv mit Retro-Adapter (Umkehrring) in umgekehrter Weise an der Kamera montiert werden oder in Retro als Tandem vor ein 105mm Objektiv. Es wird jedoch nicht die hohe Bildqualität eines Lupenobjektives erreicht.

Zur Montage in Retro sind gute Weitwinkelobjektive mit fester Brennweite geeignet, zum Beispiel das NIKKOR 24mm, 1:2.8.

Nachteilig ist der grosse Objektivdurchmesser, der eine optimale Beleuchtung erschwert. Der höhere freie Arbeitsabstand ist nicht unbedingt ein Vorteil, denn die Auflösung ist dadurch reduziert.

Das NIKKOR 24mm ist in Retro Stellung eines der besten Objektivs in dieser Art des Gebrauchs, hinkt in der Abbildungsleistung aber einem Lupen- oder Vergrößerungsobjektiv hinterher.

Die heute oft verwendeten Zoom-Weitwinkelobjektive sind in Retro noch eine Einheit schlechter und somit nicht zu empfehlen.

Telekonverter und Vorsatzlinsen

Grundsätzlich muss man sich bewusst sein, dass Telekonverter und Vorsatzlinsen eine Notlösung sind und nicht die gleiche Abbildungsqualität eines passenden Objektivs mit höherer Brennweite erreichen.

Über die Tauglichkeit von Telekonvertern gehen die Meinungen und Erfahrungen weit auseinander. Meinungen, die nicht auf Erfahrung gründen, sollte man nicht berücksichtigen. Es ist absolut zutreffend, dass Telekonverter gute Ergebnisse zeigen können und es kann auch sein, dass die Ergebnisse miserabel sind. So ist verständlich, dass die Meinungen über die Tauglichkeit sehr unterschiedlich ausfallen. Falsch ist ein generelles Urteil, das auf den Erfolg oder Misserfolg bei wenigen praktischen Anwendungen gemacht wurde.

Telekonverter sind optische Systeme, die nachträglich bei einem Objektiv zusätzlich in Gebrauch kommen und bei der Berechnung eines Objektivs nicht vorgesehen oder berücksichtigt wurden. So muss sich für eine gute Abbildungsleistung der Telekonverter nach dem Objektiv richten und so zu ihm passen.

Einfache, kostengünstige und universell einsetzbare Telekonverter sind meist unpassend und somit in ihrer Leistung mangelhaft. Erfolgreich eingesetzt werden kann ein Konverter, wenn er für eine Gruppe explizit berechneter und erwähnter Objektive zum Einsatz kommt. Solche Konverter sind nicht für den generellen Gebrauch geeignet und somit ist die Vermutung falsch, dass sie eine Lösung sind, um bei allen Objektiven die man besitzt, eine qualitativ gute Brennweitenverlängerung zu erhalten. Oft kann ein Telekonverter nur bei einem Objektiv das man besitzt, erfolgreich zum Einsatz kommen. Da gute und passende Telekonverter teuer sind, sind sie keine sehr kostengünstige Lösung. Ein 2 x Telekonverter ist allerdings leichter als ein zweites Teleobjektiv mit doppelter Brennweite.

Da sich beim Gebrauch eines Telekonverters wohl die Brennweite erhöht, aber nicht entsprechend der Durchmesser der Linsen, wird die Kombination entsprechend dem Verlängerungsfaktor lichtschwächer.

Es gibt Situationen in der sich vergrößernde Zusatzlinsen bewähren.

Löst eine Kamera geringer auf als das Objektiv, dann kann es sein, dass durch die vergrößerte Projektion des Bildes mit Telekonverter oder Vorsatzlinse auf den Chip, sich ebenfalls die Auflösung des Objektes erhöht und somit weitere Details sichtbar werden.

Verwendet man den 2 x Telekonverter (Nikon TC-200) mit dem AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D auf grössere Distanz, erhöht sich die Auflösung des Objektes und die Schärfentiefe wird geringer, aber nicht entsprechend dem Faktor des Telekonverters.

Verwendet man den 2 x Telekonverter im Bereich der Makrofotografie, ändert sich bei gleich eingestellter Blende am Objektiv, weder die Auflösung noch die optische Schärfentiefe.

Wird die Blende entsprechend dem Lichtverlust um zwei Blenden geöffnet, erhöht sich die Auflösung. Dieses Verhalten deutet auf eine Brennweitenverlängerung durch den Konverter hin. Um einen relevanten Vergleich mit einem echten Teleobjektiv mit höherer Brennweite zu erhalten, muss die Blende entsprechend geöffnet werden, damit der Durchmesser der Blendenöffnung gleich und somit vergleichbar mit einem echten Teleobjektiv mit doppelter Brennweite ist.

Diese Erkenntnis ist somit für die Makrofotografie eine gute Nachricht.

Diese Aussage gründet auf eigenen Messungen mit dem Nikon TC-200 und widerspricht Äusserungen, die man an anderen Stellen findet. Es ist somit nötig, mit der eigenen Ausrüstung eigene Vergleiche anzustellen.

Die allgemeine Bildqualität, (z.B. Kontrast) leidet bei Verwendung eines Telekonverters, es ist deshalb zu prüfen, ob ein Bildausschnitt passender wäre.

Verwendet man an einer 10MPixel DSLR ein sehr gutes Fotoobjektiv, dann löst das Objektiv höher auf als die Kamera es wiedergeben kann.

Wird nun zusätzlich ein Telekonverter oder Vorsatzlinse montiert, werden die kleinsten Details die das Objektiv auflöst, grösser auf dem Foto-Chip abgebildet und es werden somit mehr Details von der Kamera erfasst. Im resultierenden Bild wird mit dem Telekonverter oder der Vorsatzlinse und gleichem Objektiv, die Auflösung eines Objektes höher.

Bei der Verlängerung eines Tubus, in einem idealen Bereich des Abbildungsmassstabes eines Objektivs, erhöht sich der Abbildungsmassstab und die Auflösung ebenfalls, die Schärfentiefe wird geringer und der freie Arbeitsabstand wird entsprechend verkürzt.

Bei Verwendung eines Telekonverters und entsprechender Vergrößerung des Blendendurchmessers, wird der Abbildungsmassstab erhöht, die Auflösung steigert sich, die Schärfentiefe verringert sich, aber der freie Arbeitsabstand bleibt gleich.

Die Verwendung eines Telekonverters macht also auch Sinn, wenn bei einem höheren Abbildungsmassstab ein möglichst grosser freier Arbeitsabstand gewünscht ist.

Bei Vorsatzlinsen die in der Makrofotografie beliebt sind, z.B. die Raynox, verhält es sich z.T. ähnlich wie mit Telekonvertern, man muss sie am eigenen Setup prüfen.

Bei Massstäben über 1:1 machen weder Teleconverter noch Vorsatzlinsen Sinn.

Für eine optimale Bildqualität ist es sinnvoller, aber teurer, anstelle eines Telekonverters oder Vorsatzlinse, ein stärker vergrösserndes Objektiv zu verwenden

Kamera

Am kostengünstigsten ist eine Kamera die man schon besitzt und auch für die allgemeine Fotografie verwenden kann. So bieten Kameras, die in grossen Stückzahlen hergestellt werden, am meisten Leistung für das aufgewendete Geld und sind auf dem neuesten Stand der Technik. Im Bereich der Makro- und Mikrofotografie sind es die digitalen Spiegelreflexkameras (DSLR). Diese Kameras bieten den grossen Vorteil, dass sie weitgehend über viele Generationen der Modelle eines Herstellers genormt und viel passende Zubehörteile zu vernünftigen Preisen erhältlich sind.

Wird die Kamera durch eine modernere des gleichen Herstellers ersetzt (gleicher Objektivanschluss), muss im Normalfall am optischen und mechanischen Aufbau nichts verändert werden. Die Verwendung von 40-jährigen Zwischenringen, Balgen und Objektiven ist somit möglich.

Für die Makrofotografie sind Vollformat- und Crop-Kameras (DSLR) bestens geeignet. Für die Mikrofotografie mit Mikroskopobjektiven genügen Crop-Kameras. Das Bild einer Vollformatkamera muss aus Gründen der schlechten Bildqualität am Rand beschnitten werden, eignet sich aber besser als Crop-Kameras im Bereich von 1:1 bis 10:1, wenn Lupen- oder Vergrösserungsobjektive verwendet werden.

DSLR Kameras ab einer Sensorgrösse von 12MPixel (Nikon D300, Pixelpitch $5.5\mu\text{m}$) und höher bis zu 36MPixel (Nikon D810, Pixelpitch $4.0\mu\text{m}$), machen in der Makrofotografie bis 10:1 Sinn. In diesem Bereich, wenn Foto- oder Lupenobjektive verwendet werden, ist eine Vollformatkamera vorzuziehen, wenn für den gleichen Bildausschnitt stärker vergrössert werden muss und dabei ein stärker vergrösserndes Objektiv Verwendung findet, denn das stärker vergrössernde Objektiv besitzt eine höhere Auflösung.

In der Mikrofotografie (10:1 bis 100:1) ist die obere Grenze der Crop-Kameras bei etwa 24MPixel (Nikon D7100, Pixelpitch $4.0\mu\text{m}$). In der Mikrofotografie (10:1 bis 100:1) macht eine Vollformatkamera weniger Sinn, denn der Bildkreis der Mikroskopobjektive ist zu klein und somit die Bildqualität im Randbereich sehr mangelhaft. Es macht Sinn, wenn die Kamera etwa doppelt so hoch auflöst, wie die Auflösungsdaten des verwendeten Objektivs lauten.

Ist von einem Objektiv bekannt, dass es in der Bildhöhe (BH) mit 1800 Linienpaaren auflöst (1800LP/BH), reicht ein Chip der in der Bildhöhe 3600Pixel (1800LP = 3600Pixel) besitzt nicht aus, um die ganze Information die das Objektiv liefert, abzubilden. 3600LP/BH entspricht in etwa einer Kamera mit 24MPixel (4000x6000Pixel, BHxBB). Die Werte der maximalen Auflösung in LP/BH eines Objektivs, ist der Wert, bei welchem das Objektiv bei einem schwarzweissen Streifenmuster noch 10% Helligkeitsunterschied zeigt. Ist das Auflösungsvermögen der Kamera höher, werden Linienpaare, die sich mit 5% Helligkeitsunterschied unterscheiden, ebenfalls aufgezeichnet. Diese können bei der Bearbeitung nach Bedarf verstärkt und somit besser sichtbar gemacht werden. Auch ist es dienlich, wenn eine feine Kante nicht lediglich mit zwei Pixeln, sondern mit mehreren gezeichnet wird.

Um ein Bild nicht nur im Idealabstand betrachten zu können, sondern auch bei einem Schritt näher, der dann nur noch einen Bildausschnitt überblicken lässt, ist es schön, wenn dann noch weitere Details erkannt werden.

Ein etwas mehr an Pixeln erlaubt besser, den gestalterisch passenden Beschnitt des Bildes auszuwählen, ohne dass die Bildauflösung leidet.

Eine hohe Menge an Pixeln bedeutet bei gleichem Chipformat, dass die Pixel kleiner sind und somit stärker rauschen. Es ist deshalb darauf zu achten, dass mit möglichst niedriger ISO Zahl fotografiert wird.

Das Rauschen findet auf Pixelebene statt, es sind einzelne Pixel die bei real gleicher Farbe und Helligkeit, sich in der Farbe und Helligkeit von ihren Nachbarpixeln unterscheiden. Sind die Pixel viel kleiner als das kleinste abgebildete Detail, dann lässt sich durch gezielte Rauschreduzierung bei der Bearbeitung das Rauschen vermindern, ohne dass die feinsten Details in Mitleidenschaft gezogen werden.

Natürlich gibt es professionelle Kameras mit grossen rauschcharmen Pixeln und dennoch hoher Auflösung, diese Kameras kosten aber ein vielfaches einer hochauflösenden DSLR!

Das Mikroskopobjektiv NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0 löst mit etwa 2250LP/mm auf. Ist es an einer Crop-DSLR mit einer Chipbreite von 23.5mm montiert, dann bildet es bei Nennvergrößerung auf dem Chip 880LP/BB ab. Dazu werden im Idealfall in der Bildbreite 1760 Pixel benötigt. Wird dazu eine 24MPixel Kamera verwendet die in der Bildbreite 6000Pixel (3000 LP/BB) besitzt, dann ist man geneigt, dies als absoluten Pixelwahn zu bezeichnen.

Da bei steigender Vergrößerung bedingt durch das Objektiv, weniger Zeilen aufgelöst werden, ist es umso wichtiger, die gesamte Information die das Objektiv liefert, auf dem Chip festzuhalten.

Bei einer 60fachen Vergrößerung besteht die Gefahr, dass durch Erschütterung die Auflösung leidet. Es ist deshalb erst recht angebracht, die gesamt vorhandene Information des Objektivs festzuhalten, um mit Deconvolution (Zurückrechnen der Verwischung) erfolgreich die feinsten Details wieder mit Software klar sichtbar zu machen. So auch Details, die einen geringeren Helligkeitsunterschied als 10% besitzen zu erfassen und zu verstärken. Natürlich wird dazu nicht unbedingt eine dreifach höhere Auflösung der Kamera im Vergleich zum Objektiv benötigt, doch die überhöhte Auflösung der Kamera richtet keinen Schaden an.

Bei einer Kamera mit überhöhter Auflösung ist die Bearbeitung exakter und feiner auszuführen. Dieser Vorteil in der Bearbeitung zeigt sich auch, wenn das resultierende Bild schlussendlich mit reduzierter Auflösung dargestellt wird und recht deutlich wird der Vorteil bei grossformatigen Ausdrucken. Man darf sich nicht täuschen lassen, weil bei unbearbeiteten Bildern die verkleinert dargestellt werden, nur ein kleiner Unterschied zwischen angepasster Auflösung und überhöhter Auflösung der Kamera zu sehen ist. Der Unterschied tritt erst bei und mit der Bildbearbeitung zu Tage und die Bildbearbeitung ist bei Focus-Stacking immer nötig!

Aus den genannten Gründen ist somit die Warnung vor dem Pixelwahn weitgehend unbegründet.

Um in den Genuss der besten Bildqualität zu kommen ist es unbedingt nötig, im RAW Format aufzuzeichnen und die Bilder vor dem Stacken in das 16bit TIF Format (3x16bit = 48bit), das je Farbe 65536 Helligkeitsstufen besitzt, umzuwandeln.

Um eine Reduzierung der Auflösung durch Erschütterungen zu vermeiden, ist ein Fotografieren mit Blitz dienlich. Die Blitzabbrennzeit sollte möglichst kurz sein, dies erreicht man durch die Drosselung der Blitzleistung und Verwendung mehrerer Blitzgeräte (3-4 Stk.). Ein Spiegelhochklappen vor dem Auslösen und eine lange Belichtungszeit (1 Sek. im abgedunkelten Raum) mit einer Blitzauslösung kurz vor dem zweiten Verschlussvorgang (also kurz vor Schliessen des Verschlusses), reduzieren das Verwischen des Bildes durch Bewegung.

Das weisse Licht des Blitzgerätes bietet im Vergleich zu einer warmweissen Beleuchtung den Vorteil, dass die Wellenlänge des Lichtes kürzer ist und somit kann die Auflösung etwas höher sein.

Bei der ganzen Problematik, die sich im Makro- und Mikrobereich in der Fotografie ergibt, sei ein positiver Aspekt erwähnt. Da die Objektive weit weg vom Chip montiert sind, treten die Lichtstrahlen auch im Randbereich und Ecken im idealen Winkel von etwa 90° auf den Chip und es sind somit keine Probleme vorhanden, die bei der Verwendung von Weitwinkelobjektiven ohne Zwischenringe oder Balgen in Normalstellung bei einem schrägen Lichteinfall im Randbereich des Sensors auftreten.

4K UHD, mit Nikon D500

Beim Stacken von Tieren, die sich während des Stackens leicht bewegen oder Pflanzen die welken, gelingen die Stacks nur selten.

Verzichtet man auf eine extrem hohe Klarheit der Bilder, kann man auf das klassische Stacken mit Blitzlicht und der langen Zeit der Anfertigung von vielen Bildern, bis zu einer Stunde, verzichten. Dazu eignet sich das Video-Aufzeichnungsverfahren im 4K Modus. Als Beispiel nenne ich hier die Nikon D500. Sie zeichnet 4K UHD Videos im MOV Modus auf, mit einer Auflösung von 3840x2160 mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde. Dazu wird der mittlere Bereich (3840x2160) des Fotochips (5568x3712) verwendet. Die Auflösung wird somit nicht reduziert, lediglich der Bildausschnitt wird in der Breite um den Faktor 1.45 und in der Bildhöhe um den Faktor 1.7 kleiner. Im Vergleich zum Vollformat mit einer Bildbreite von 36mm entspricht die Bildbreite von 16.2 mm dem Crop-Faktor von 2.2.

Beim Filmen im Full HD 1.080p Format (1920x1080Pixel) bleibt der Bildausschnitt in etwa erhalten, es werden jedoch bei der Nikon D500 jeweils etwa 9 Pixel zu einem zusammengefasst. Die Bildbreite entspricht so, wie beim Fotografieren, dem Crop-Faktor 1.53. Im Full HD 1.080p Format (1920x1080Pixel) sinkt somit die Auflösung. Die Farbtiefe der 4K UHD Video beträgt 8Bit, dies entspricht der Farbtiefe des JPG Formates.

Sowohl die Empfindlichkeit (ISO) als auch die Belichtungszeit kann frei gewählt werden, jedoch ist der Einsatz von Blitz mit einer extrem kurzen Abbrennzeit nicht möglich. Man ist somit auf den Einsatz von Dauerlicht angewiesen. So wie beim Filmen üblich, ist für eine gute Qualität sehr viel Licht notwendig, dies auch deshalb, weil die verminderte Farbtiefe mit 8Bit eine absolut gute und genügend helle Beleuchtung benötigt. Die Empfindlichkeit sollte 100 ISO betragen und da die Kamera oder das Objekt beim Stacken stetig bewegt wird, sollte die Belichtungszeit kürzer als etwa 1/500 Sekunde betragen, denn nur so wird durch Verwischung keine Reduzierung der Auflösung erreicht. Wie erwähnt ist deshalb sehr viel Dauerlicht nötig.

Die Nikon D500 speichert das Video im MOV Format ab, aus welchem man z.B. mit der Freeware IrfanView die Einzelbilder extrahieren und im BMP Format abspeichern kann. Die BMP Bilder können dann direkt mit Zerene Stacker gestackt und im 16Bit TIF Format abgespeichert werden. Bei Verwendung von Photoshop können die Einzelbilder im TIF 8Bit Format gespeichert werden. Beim Rendern kann eine leichte Korrektur der Bilder (z.B. Helligkeit) vorgenommen werden. Beim Filmen im 4K UHD Format verändert die Nikon D500 die Bilder nur minimal mit Schärfung, Kontrasterhöhung usw.. Für eine gute Retusche und Bearbeitungsmöglichkeit kann das Bild mit doppelter Grösse abgespeichert werden.

Aus dem Erwähnten wird klar, dass die Bildqualität des 4K UHD und daraus erfolgten Stacks, nicht der Qualität eines klassischen Stacks entspricht, der aus RAW Bildern hergestellt wurde.

Halten lebende Tiere kurzzeitig still oder welken Pflanzen sehr schnell, dann ist mit etwas geringerer Bildqualität ein Stacken mit dem 4K UHD Format möglich.

Die Nikon D500 bietet ebenfalls die Möglichkeit, bis zu 10 Bilder pro Sekunde im RAW Format mit voller Farbtiefe (12Bit oder 14Bit) und voller Auflösung anzufertigen, dies in einer Serie bis zu 200 Bildern. Verwendet man dazu mehrere Blitzgeräte mit gedrosselter Leistung (1/128 Leistung), ist die Qualität der Bilder gut erkennbar besser.

Wenn eine Serie von 200 Einzelbildern für einen Stack reicht (evtl. mit grösseren Stackschritten), ist dieses Aufzeichnungsformat dem 4K UHD VideofORMAT vorzuziehen.

Vergleicht man das einstige analoge Filmmaterial mit den heutigen digitalen Fotosensoren, dann ist die Bildqualität, nicht nur nach meiner Meinung, in etwa gleich gut. Dennoch gibt es auch die Meinung, dass dem nicht so ist.

Ich möchte hier vor allem auf das Bildformat mit unterschiedlicher Bildfläche näher eingehen. Sowohl bei analoger, als auch bei digitaler Aufzeichnung ist zu beachten: je grösser das Bildformat ist, umso mehr muss bei gleichem Bildausschnitt optisch stärker vergrössert werden. Dies wird mit einer längeren Brennweite, oder bei Objektiven die in Retro sind oder montiert werden, mit einer kürzeren Brennweite erreicht.

Ein kurzer Überblick über die analogen Filmformate:

Das 70mm Filmformat ist die absolute Superlative, das für Kinofilme, oft auch in Monumentalfilmen (Ben Hur, Quo Vadis, Die zehn Gebote) zur Anwendung kam. Bei solchen Filmen, deren Herstellungskosten zweistellige Millionen-Dollarbeträge verschlangen, ging man davon aus, dass sie mit Sicherheit ein Mehrfaches der Herstellungskosten einbringen werden. Dennoch haben die Produktionskosten des Films "Cleopatra" die Produktionsfirma 20th Century Fox an den Rand des Ruins getrieben. Doch dies nicht bedingt durch das 70mm Filmformat, sondern durch andere aufwendige Herstellungskosten.

Das 35mm Filmformat (Normalfilm) wurde ursprünglich zu filmischen Zwecken hergestellt und erst später auch in der Fotografie eingesetzt. Beim Filmen mit dem 35mm Filmformat stehen die Bilder quer zum Bildstreifen, während sie beim Fotografieren längs zum Filmstreifen stehen. Die Bildfläche beim Filmen beträgt knapp 400mm^2 ($22\text{mm} \times 18\text{mm}$). Bei der Fotografie wird eine Bildfläche von 864mm^2 ($36\text{mm} \times 24\text{mm}$), also etwa die doppelte Fläche genutzt. Die von Auge empfundene Bildqualität ist etwa vergleichbar, da das bewegte Bild des Filmes nicht so hoch aufgelöst sein muss wie bei einer Fotografie, bei welcher ein Bild lange betrachtet werden kann. Ein Filmformat kann also von der Bildfläche halb (bis Viertel) so gross sein, wie bei einer Fotografie, um den gleichen Bildqualitätseindruck zu erhalten. Während beim Filmen das 35mm Format als absolut professionell gilt, ist beim Fotografieren das 35mm Format gerade noch professionell tauglich, das Mittelformat, grösser als $60\text{mm} \times 45\text{mm}$, ist professionell vorzuziehen.

Das 16mm Filmformat mit einer Bildfläche von 77.5mm^2 ($10.3\text{mm} \times 7.5\text{mm}$), wird auch für dokumentarische, professionelle Filme verwendet und wurde von engagierten Hobby Filmern mit genügend finanziellen Mitteln verwendet.

Das 8mm Filmformat, als Normal-8 ($4.9\text{mm} \times 3.6\text{mm} = 17.64\text{mm}^2$) oder ab 1965 das Super-8 Format ($5,69\text{mm} \times 4.22\text{mm} = 24\text{mm}^2$), wurde professionell nur selten eingesetzt, es waren die verbreitetsten Hobby-Filmer Formate.

Zusätzlich gab es noch das Doppel 8 Format. Hier wurde das 16mm Filmformat verwendet, das bei zwei Durchgängen durch die Kamera jeweils auf der Hälfte der Filmstreifenbreite belichtet und nach der Entwicklung der Länge nach auseinander geschnitten wurde.

Bei der Nikon D500 wird für das Videoformat 4K UHD vom Fotosensor ($23.5\text{mm} \times 15.7\text{mm}$) nur ein Bereich von $16.2 \times 9.13\text{mm}$ verwendet, die Auflösung in LP/mm bleibt somit erhalten, jedoch ist der Bildausschnitt kleiner. Für den gleichen Bildausschnitt muss somit weniger stark vergrössert werden, als wenn mit der gesamten Chipfläche fotografiert wird. Die genutzte Bildfläche auf dem Sensor beträgt 148mm^2 , sie ist etwa doppelt so

gross wie beim analogen 16mm Filmformat, jedoch immer noch um den Faktor 2.7 in der Fläche kleiner als beim professionellen 35mm Filmformat. Die doppelte Fläche des 16mm Film-Bildformates bedeutet eine professionell akzeptable und gute Bildqualität. Vergleicht man die Filmqualität mit einer Fotografie, mit dem oben erwähnten Faktor von 2 bis 4, dann entspricht dies einem Fotochip ($2 \times 148 \text{ mm}^2 = 296 \text{ mm}^2$ bis $4 \times 148 \text{ mm}^2 = 592 \text{ mm}^2$) in der qualitativen Höhe zwischen dem Kleinbildformat mit Crop-Faktor 1.5 ($23.5\text{mm} \times 15.7\text{mm} = 369 \text{ mm}^2$) und dem Kleinbild-Vollformat ($36\text{mm} \times 24\text{mm} = 864 \text{ mm}^2$).

Kurze Geschichte der Linsen und Objektive

In mesopotamischen Ausgrabungen, die mit einem Alter von 5000 Jahren datiert wurden, fand man aus Quarz geschliffene Linsen. Erstaunlich sind auch die Funde aus Wikingergräbern, die aus dem 8. - 12. Jahrhundert stammen. Hier fand man grosse, gut korrigierte asphärische Linsen. Diese mit hohen Herstellungskosten verbundene Technik, ist in der Neuzeit erst wieder seit etwa 1950 bekannt.

Isaak Newton (1643-1727) hielt die Farbfehler (Dispersion) der sphärischen Linsen für nicht korrigierbar.

Im Jahre 1728 fand jedoch Chester Hall (1703-1771) eine Lösung. Er kombinierte Zerstreuungs- und Sammellinsen mit unterschiedlicher Dispersion, dies ergab den Achromaten.

1804 reduzierte William Hyde Wollaston (1766-1828) die sphärische Aberration durch die Ausformung einer Linse als Meniskus (Wollaston Meniscus).

In der 1839 aufkommenden Fotografie kam dieser Meniskus in den Achromaten (Chevalier Landscape, Gauss-Prinzip) zur Anwendung.

1850 (1857) beschrieb der Mathematiker Ludwig von Seidel die fünf klassischen, optischen und nach ihm benannten monochromatischen Abbildungsfehler (Verzeichnung, Koma, sphärische Aberration, Astigmatismus und die Bildfeldwölbung).

1890 erster Anastigmat (Protar) von Zeiss.

1893 zweiter Anastigmat (Cooke-Triplet) von Harold Dennis Taylor (1862-1943), Triplet = Dreiergruppe (drei freistehende Linsen), Cooke = Herstellerfirma, Thomas Cooke & Son. (Das Zeiss Luminar 63mm/0.11, 1:4.5 und das Zeiss Luminar 40mm/0.13, 1:4, sind solche einfache Objektive. Diese Dreilinser sind die einfachste Möglichkeit, die Seidelschen Abbildungsfehler sinnvoll zu korrigieren).

1896 ergänzte Paul Rudolph den Doppel-Gauss (Planar) durch eine vor- und eine nachgeschaltete Linse und korrigierte so den Astigmatismus. Dieser erweiterte Doppel-Gauss setzte sich allgemein aber erst ab 1960 durch.

1902 erweiterte Paul Rudolph das Triplet durch eine weitere verkittete Linse zum Tessar, dadurch wurden erstmalig alle Bildfehler weitgehend korrigiert.

(Das Zeiss Luminar 100mm/0.08, 1:6.3 und das Zeiss Luminar 25mm/0.15, 1:3.5 sind Tessar-Objektive).

Weitere Fortschritte in der Herstellung von Linsen und der Objektivbauweise äusserten sich durch die Vergütung der Linsen, im erhöhten Kontrast, der Erhöhung der Auflösung im Randbereich des Bildkreises und ab 1959 (Voigtländer, Zoomar 2.8/36-82mm) den Zoomobjektiven.

Diese Verbesserungen der Handlichkeit und Abbildungsleistung sind jedoch im Zeitalter der digitalen Bildbearbeitung nicht alle von grosser Bedeutung!

Objektive allgemein

Jedes Objektiv ist für eine spezielle Anwendung optimiert. Wird es ausserhalb seiner Spezifikation eingesetzt, dann ist die Abbildungsleistung geringer.

Objektive sind in ihrem vorgesehenen Einsatzbereich derart optimiert, dass es seit Jahrzehnten keine allgemein nennenswerte Verbesserungen gibt.

Es gibt allerdings neue Einsatzbereiche, auch wenn es nur neue Teilbereiche bekannter Einsatzbereiche sind, die davon Nutzen ziehen können, wenn Objektive für diesen Teilbereich optimal angepasst werden.

Je besser ein Objektiv für einen ganz speziellen Bereich optimiert ist, umso schlechter ist es im allgemeinen für einen anderen Bereich geeignet.

Beim Einsatz von Objektiven ist daher in erster Linie darauf zu achten, dass man genau das Objektiv verwendet, das für den gewünschten Einsatz optimiert ist und dass es genau nach den Spezifikationen eingesetzt wird.

Somit sind Telekonverter, Vorsatzlinsen, Tandemkombination und andere Veränderungen am Strahlengang oft mit Qualitätseinbussen verbunden!

Wären solche Veränderungen eine Verbesserung, würde man sie schon seit Jahrzehnten professionell verwenden.

Für einen kleinen Geldbeutel können aber die preisgünstigen oben erwähnten Veränderung und Kombinationen Sinn machen. Für wenig Geld erhält man eine einigermaßen akzeptable Lösung. Jedoch ist diese Lösung nur preisgünstig, wenn man bei ihr bleibt und nie höhere Ansprüche an die Abbildungsqualität stellt. Dieser Fall tritt jedoch selten ein. Früher oder später beschafft man sich eine bessere Lösung, die wieder Geld kostet und immer noch nicht die beste Lösung ist. So sammeln sich dann beim Sparer viele nicht ganz optimale Lösungen an, bis er zu der besten Lösung greift, dem passenden Objektiv. Dieser Weg ist der teuerste Weg! In der Optik werden keine weltbewegend neue Erfindungen gemacht, Objektive die vor 20 Jahren Spitzenobjektive waren, sind heute immer noch sehr gut!

Neue Objektive gibt es in erster Linie für neue Einsatzgebiete.

Was der Abbildungsleistung am meisten schadet, ist, wenn ein Objektiv falsch eingesetzt wird, also nicht entsprechend seiner Spezifikation oder in einem falschen Bereich.

Es geht hier nicht darum, billige und schlechte Objektive mit teuren und guten zu vergleichen, sondern klar zu machen, dass jedes Objektiv für einen ganz bestimmten Verwendungszweck hergestellt wurde.

Objektive haben ihren Preis:

1:1 bis 3:1 benötigt es ein 105mm Makro-Fotoobjektiv für etwa 800.- Euro

3:1 bis 10:1 sind alte gebrauchte Lupenobjektive die beste Lösung, sie kosten etwa 200.- bis 500.- Euro.

10:1 bis 100:1 sind ebenfalls alte gebrauchte Mikroskopobjektive zu empfehlen, sie sind ebenfalls für etwa 500.- Euro erhältlich.

Dies sind einmalige Anschaffungspreise, denn bei sorgsamem Gebrauch halten sie mehrere Menschenleben lang. Dies ist die kostengünstigste Lösung.

Bei Farbstiften kauft man sich üblicherweise eine Schachtel mit allen Farben, da man ja nicht jahrelang nur mit einer Farbe zeichnet.

Bei Objektiven kauft man sich keine Serie, sondern übt sich jahrelang mit einem Objektiv bis man es kennt, erst dann schafft man sich das nächste mit einer anderen Vergrößerung an.

Die Einarbeitungszeit z.B. mit einem Mikroskopobjektiv 20/0.4 mit Focus-Stacking kann Jahre dauern. Beim ersten angefertigten Bild denkt man, das Objektiv sei defekt und man kann sich anhand seiner Abbildung nicht orientieren und weiss nicht, was es zeigt, geschweige denn, dass man einen passenden Bildausschnitt wählen kann. Üblicherweise legt man es dann frustriert beiseite und unternimmt zu späteren Zeitpunkten dasselbe

Prozedere mit ähnlichem Resultat, bis man sich eines Tages der Problematik annimmt und erste befriedigende Bilder herstellt. Bei jeder Neuanschaffung eines Objektivs mit einem höheren Abbildungsmaßstab wiederholt sich dieses Erlebnis, allerdings dauert die Bewältigung der Problematik nicht mehr so lange.

Ein billiges Objektiv mit schlechter Abbildungsleistung und all die benötigten Stunden, sind den Frust nicht wert, den man erleiden muss. Da ist es sinnvoller, man leistet sich mit grossen zeitlichen Abständen ein neues Objektiv, das nach all dem Frust gute Bilder ergibt.

Der Weg ist nicht, dass man zufälligerweise ein kostengünstiges Objektiv kauft und dann schaut, wozu es dient, denn die Möglichkeit, dass es zu dem dient, was wir möchten, ist sehr gering!

Zuerst muss man sich klar werden, was man will und dann sucht man das passende Objektiv.

Das Objektiv ist das Herzstück eines Setups, das, wenn richtig gewählt, für immer hält. Neuanschaffungen tätigt man eher bei Kamera, Beleuchtung, Stacktisch, Hard- und Software.

So ist das Objektiv auch das einzige Bauteil im Setup, das einen Charakter besitzt. Oft ist es das einzige analoge Bauteil im Setup, so kann es das Objekt hart, weich, warm oder kalt abbilden. Je nach Fotografen kann dieser Charakter zu ihm passen oder nicht. Passt er nicht, wird der Fotograf damit selten gute Bilder herstellen können, ausser er ist tolerant und konfliktbereit.

Eine Kamera tut das, was man ihr sagt, das Objektiv tut dies nicht immer so, wie man es möchte. Man muss auf seinen Charakter eingehen können.

So ist es auch gut, wenn man weiss, dass die Kamera samt Chip regelmässig gereinigt werden muss, die Objektivlinsen die Berührung aber nicht mögen.

Die Kamera ist ein Arbeitsgerät, das das Bild, das vom Objektiv geliefert wird, möglichst gut aufzuzeichnen hat. Das Objektiv ist das eigentliche Herzstück, das für die Bildqualität verantwortlich ist und auch einen eigenen Charakter besitzt..

Die Frage lautet somit nicht: wie reinigt man ein Objektiv, sondern wie geht man mit ihm um, damit es nicht gereinigt werden muss.

In der Handhabung wird nach Möglichkeit das Objektiv festgehalten und der Adapter zur Montage schrittweise im Kreis bewegt. Der Adapter kann und darf auf den Boden fallen, das Objektiv nie! Eine Kamera kann beim Hantieren auf den Boden fallen, ein Objektiv wird immer sicher in der Hand festgehalten!

Eine Kamera die auf den Boden fällt, bringt man zur Reparatur, fällt ein Objektiv auf den Boden, dann entzieht man dem Fotografen die "Lizenz zu Töten".

Ein Objektivwechsel ist immer eine Handlung, die überlegt und klar begründet vorgenommen wird, sie wird in Ruhe getätigt.

Das Objektiv muss so gewählt werden, dass es nie an einer schlechten Aufnahme Schuld hat!

Mikroskopobjektive sind oft so optimiert, dass sie in der Bildmitte eine höchstmögliche Auflösung besitzen, dies geht oft auf Kosten der Randauflösung. Somit ist bei solchen Objektiven ein etwas höherer Verlust der Auflösung zum Rand typisch.

Fotoobjektive die für eine Crop-Kamera berechnet sind, eignen sich nicht für Vollformat, da die Vollformatkamera einen grösseren Bildkreis erfasst, als ein Crop-Kameraobjektiv mit guter Auflösung bis zum Bildrand (Bildecken) der Vollformatkamera abbilden kann. Verwendet man ein Vollformatobjektiv, das für einen grossen Bildkreis berechnet ist, an einer Crop-Kamera, so kann es sein, dass in der Bildmitte nicht die gleich hohe Auflösung erreicht wird, wie mit einem Crop-Objektiv.

Verallgemeinert kann man sagen: je höher die Auflösung eines Objektivs in der Bildmitte ist, umso schneller fällt diese zum Bildrand ab. Dies ist in der Fotografie sichtbar und somit nicht erwünscht. Je grösser der hoch und gleichmässig aufgelöste Bildkreis eines Objektivs ist, um so geringer kann die Auflösung in der Bildmitte sein. Dies ist ein entscheidender Unterschied zwischen Mikroskop- und Fotoobjektiven.

Mikroskopobjektiv: maximale Auflösung in der Bildmitte und sichtbarer Auflösungsabfall zum Bildrand.

Fotoobjektiv: minimaler Auflösungsabfall zum Bildrand und im Vergleich zum Mikroskopobjektiv, etwas geringere Auflösung in der Bildmitte.

In der Fotografie ist es bei der Beurteilung, ob ein Objektiv geeignet ist, nötig, dass die Auflösung nicht nur in der Bildmitte, sondern auch in den Bildecken gemessen und für die Eignung berücksichtigt wird.

ZEISS Luminar Lupenobjektive

Ein Objektiv bildet die Realität auf einer planen Fläche ab. Je nach vorgesehenem Verwendungszweck wird ein Bild auf einer Film- oder Fotosensorebene abgebildet. Je nach Grösse des Filmmaterials oder des Fotosensors muss der Bildkreis entsprechend gross sein. Für die Fotografie im Makro- und Mikrobereich sind Lupenobjektive konstruiert (Zeiss Luminar, Leitz Milar, Photar und Summar usw.). Je grösser der Bildsensor, umso grösser sind bei gleicher Anzahl die Pixel und somit das Rauschen geringer. Ein weiterer Vorteil eines grösseren Sensors ist, dass optisch stärker vergrössert werden muss um den gleichen Bildausschnitt auf dem Sensor abzubilden und dadurch die Auflösung eines stärker vergrössernden Objektivs höher ist!

Lupenobjektive sind optisch einfach zu konstruieren. Sie besitzen einen kleinen Aufnahmewinkel, die Strahlengangrechnung und Bildfehlerkorrektur benötigt keine speziellen Glassorten oder anderen grösseren Aufwand. Es gibt in der Fotografie keine problemloseren Objektive. Teuer sind die robusten Luminare, weil ihre Fassung mit massivem Messing von Hand gearbeitet sind. Zeiss hat an diesen Objektiven nur wenig Geld verdient, doch die hohe Qualität war beste Reklame.

In der Bildmitte ist die Abbildungsqualität am höchsten, je weiter von der Bildmitte entfernt, umso geringer die Auflösung und es treten vermehrt Abbildungsfehler auf. Gut erkennbar sind die Abbildungsfehler (Aberrationen), die durch die chromatische Aberration auftreten. Da die Farben des Lichtes beim Passieren einer Linse unterschiedlich stark gebrochen werden, entstehen an Kanten der Abbildung, vor allem im Randbereich, Farbränder (Farbquer- und Farblängsfehler). Zu den Aberrationen gehören noch weitere Abbildungsfehler, die hier nicht erwähnt werden, da sie sich nicht so stark äussern wie der Auflösungsverlust und die durch CA (chromatische Aberration) hervorgerufenen Farbränder.

Zeiss Luminare wurden für die Fotografie am Mikroskop bis zum Grossbildformat hergestellt, sie ermöglichen das Fotografieren ohne Okular. Sie besitzen einen sehr grossen Bildkreis, ihr Auflösungsvermögen nimmt zum Bildrand, bei Verwendung an einer Crop- oder Vollformatkamera, nur minimal ab. Da ihre Bildqualität sehr gut ist, sie besitzen ein sehr hohes Auflösungsvermögen, können sie sehr gut bis zu einem Foto-Bildformat von 6x6cm und einer Bildweite (Distanz zwischen Objektiv und Bildebene) von 125mm bis 300mm eingesetzt werden. Gerechnet wurden sie bis zum Grossformat von 18x24cm. Da ihr Bildwinkel weniger als 35° beträgt, lässt sich eine Korrektur mit drei Linsen (Gliedern) einfach ausführen. Es sind dies die Objektive der Bauarten Triplet und Taylor (Tessar). Die Taylor Bauart war ursprünglich ein dreilinsiges Objektiv, das Dr. Rudolph (Fa. Zeiss) durch eine vierte Linse erweiterte, die mit der hintersten Linse verkittet wurde und so eine bessere Abbildung ergab.

Luminare sind einfache Linsensysteme die keiner grossen Korrektur bedürfen und somit auch ohne modernste Vergütung der Linsen eine sehr gute Abbildungsqualität erreichen. Die Luminare wurden aus Glas mit einem Brechungsindex der "1,5-Klasse" hergestellt (heute verwendet man für Objektive Glassorten mit einem höheren Brechungsindex). Bei diesem kleinen Brechungsindex (1,5-Klasse) ist eine Korrektur der CA (chromatische Aberration) bei Weniglinsern (bis 4 Linsen) noch nicht nötig, da die CA nicht störend ist.

Luminare und so auch andere Lupenobjektive (z.B. Photare, Leitz Wetzlar) sind, wenn sie normal montiert werden, in Retro (umgekehrt). Man erkennt dies, wenn man ihre

Brennweite mit dem Vergrößerungsfaktor betrachtet. Das Luminar 100mm zeigt einen grösseren Bildausschnitt als das Luminar 16mm. Die kurze Brennweite vergrössert somit stärker.

Bei den üblichen Fotoobjektiven ist es umgekehrt, da zeigt ein 16mm (Weitwinkelobjektiv) einen grösseren Bildausschnitt und vergrössert somit weniger als ein 100mm Teleobjektiv.

Das grosse 6x6cm Bildformat erlaubt dem Fotografen im Nachhinein in aller Ruhe, den Bildausschnitt zu wählen, sogar als Hoch- oder Querformat und dies bei verbleibend genügend hoher Bildauflösung. So ist auch die Verwendung der Luminare mit einer Vollformatkamera sehr dienlich, denn ein Beschnitt ist immer noch möglich, bei einer verbleibend guten Bildqualität. Zwischen Hoch- oder Querformat kann allerdings nicht mehr ohne sichtbare Verluste gewählt werden.

Bei den Luminar Objektiven ist die Auflösung in der Bildmitte nicht ganz so hoch wie bei modernen Mikroskopobjektiven, jedoch bleibt diese weitgehend konstant bis zu einem Bildkreis, der den von Mikroskopobjektiven weit übersteigt. Dies ist vor allem in der Fotografie ein grosser Vorteil der Luminare.

Luminare können deshalb mit sehr guter Abbildungsleistung bei Vollformatkameras eingesetzt werden, im Gegensatz zu den Mikroskopobjektiven, die für Vollformat einen zu kleinen Bildkreis besitzen und dadurch einen hohen Auflösungsabfall zum Rand aufweisen.

Ausserdem sind Luminare, was den Abbildungsmassstab und somit eine optimale Anpassung an den gewünschten Bildausschnitt betrifft, bei optimaler Bildqualität sehr flexibel. Mikroskopobjektive müssen bei ihrer Nennvergrößerung eingesetzt werden, ein optimaler Bildausschnitt ist somit beim Anfertigen der Bilder Voraussetzung. Beim Focus-Stacking ist es schwierig den passenden Bildausschnitt zu finden, da das ganze Bild in seiner vollen Schärfe beim Fotografieren nicht begutachtet werden kann.

Erwähnenswert ist ebenfalls die natürliche Farb- und Kontrastwiedergabe bei den Luminaren. Gute Mikroskopobjektive zeichnen bewusst farb- und kontrasthärter, damit vom Auge feinste Details besser erkannt werden.

Luminare sind Fotoobjektive, Mikroskopobjektive sind für die Betrachtung mit dem Auge optimiert.

Die beste Bildqualität liefern Luminare bei offenster Blende, sie ist jeweils mit einer "1" bezeichnet. Bei Blende "2" ist die Blende um einen Blendenwert geschlossener und benötigt deshalb doppelt so viel Licht, oder die doppelte Belichtungszeit. Weitere Werte sind 4, 8, 15, 30. Diese entsprechen jeweils einem Blendenwert und geben somit den Faktor an, um welchen stärker oder länger belichtet werden muss.

Durch das Abblenden wird die Schärfentiefe erhöht, jedoch sinkt die Auflösung. Bei Blende 2 ist die Auflösung um etwa 4% geringer, bei Blende 4 um 10%, bei Blende 8 um 20% und bei Blende 15 um 40% geringer als bei Blende 1.

Da die Luminare ihre höchste Auflösung bei offenster Blende zeigen, sind sie im Durchmesser kleiner als Foto-, Vergrößerungs- und Repröobjektive, da diese oft im Durchmesser eine grössere maximale Blende besitzen, die aber nicht die höchste Auflösung bietet. Somit sind die Luminare mit ihrem kleinen Durchmesser besser zur Auflichtbeleuchtung geeignet, sie dunkeln bei der Beleuchtung weniger stark ab. Eine Ausnahme ist das Luminar 16mm, das im Vergleich zu Mikroskopobjektiven, eine Fassung mit einem sinnlos grossen Durchmesser besitzt.

Foto-, Vergrößerungs- und Reoprojektive besitzen oft einen höheren freien Arbeitsabstand, der oft keine bessere Auflicht Beleuchtung zulässt, da der Objektivdurchmesser um einiges grösser ist. Bedingt durch den oft grösseren freien Arbeitsabstand, ist optisch bedingt die Auflösung geringer.

Es gibt allerdings auch Ausnahmen, z.B. das Rodenstock APO Rodagon 1:2.8, $f = 50\text{mm}$ (in Retro), es ist an der Nikon D810 ein ausgezeichnetes Objektiv und übertrifft da die Luminare. Dies ist an einer weniger hochauflösenden Kamera, z.B. Nikon D600 oder D7000 nicht der Fall.

Die Zeiss Luminare sind somit für einen Abbildungsmassstab von etwa 2:1 bis 9:1 eine sehr gute Wahl.

Nicht alle Luminare zeigen ihre beste Abbildungsleistung in diesem Bereich.

Das Luminar 100mm liegt in seiner Abbildungsqualität bei einer Vollformat- oder Crop-Kamera unter der eines zeitgemässen, guten Foto-Makroobjektivs um die 100mm am Balgen. Der freie Arbeitsabstand mit einem 100mm Makroobjektiv ist so hoch, dass sich mit einem Luminar 100mm keine erwähnenswert bessere Beleuchtung verwirklichen lässt. Seine sehr gute Abbildungsleistung kommt erst bei einer Grossformat-Kamera zur Geltung.

Das Luminar 63mm ist bei 2:1 bis 4:1 mit dem MP-E 65mm oder einem Foto-Makroobjektiv 100mm mit Zwischenringen oder Balgen vergleichbar.

Das Luminar 40mm bietet bei 4:1 die höchste Auflösung, es löst 20% höher auf als das Luminar 63mm oder vergleichbare Objektive.

Das Luminar 25mm (exakte Brennweite beträgt 26mm) ist im Bereich 6:1 bis 9:1 ein sehr gutes Objektiv.

Das Luminar 16mm, mit seinem sinnlos grossen Gehäusedurchmesser und einer Apertur von 0.2, kann gut durch Mikroskopobjektive ersetzt werden. Ab 10:1 ergibt sein grosser Bildkreis an einer Vollformat-Kamera keine besseren Bilder als Mikroskopobjektive (z.B. 10/0.25 oder 10/0.3) an einer Crop-Kamera. Die speziell gute Abbildungsleistung des Luminar 16mm kommt erst bei grösserem Bildkreis (Mittelformat) zum Tragen, denn ab einem Crop-Faktor von 1.5 und kleiner, ist der Bildkreis der Mikroskopobjektive viel zu klein.

Allgemein sind die Luminare sehr robust gearbeitet und auch ältere Exemplare sind mechanisch gut erhalten.

Zur Verwendung an modernen digitalen Kameras (DSRL), ob Vollformat oder auch Crop, sind die Luminare 25mm, 40mm und 63mm bestens geeignet. Der Ruf nach moderneren, besseren Objektiven in diesem Abbildungsmassstab ist nicht unbedingt gerechtfertigt, denn Objektive die nach neuesten Erkenntnissen gefertigt sind, bilden qualitativ nicht viel besser ab.

Ebenfalls sind Vergrößerungsobjektive in diesem Bereich zu empfehlen. Ihre Grösse und der nötige höhere Auszug (Distanz zwischen Objektiv und Foto-Chip) ist aber unhandlicher und kann ein Hindernis sein.

Abblenden bei ZEISS Luminar

In der Fotografie gilt: Ein Objektiv bildet am besten ab, wenn es um ein bis zwei Blendenwerte abgeblendet ist. Manchmal trifft dies wirklich zu, reicht aber für eine allgemeine Aussage nicht! Man könnte daraus schliessen, dass mit einem lichtstärkeren Objektiv mit einer grösser geöffneten Blende, die bessere Bildqualität erreicht werden könnte als mit einem nicht so lichtstarken Objektiv.

Auch wenn man wie hier vorwiegend von qualitativ guten Objektiven spricht, muss ein Objektiv getestet (ausgemessen) werden, um genau zu wissen, wie die beste Bildqualität erreicht wird.

Die Problematik beginnt schon bei der Definition "beste Bildqualität". Dies ist kein eindeutiger Wert, der durch eine exakte Einstellung beim Objektiv erreicht wird. Denn nicht alle kritischen Eigenschaften eines Objektivs sind bei einer bestimmten Einstellung optimal.

Oft sind Objektive, die in der Bildmitte nicht so hoch auflösen, am Bildrand besser als Objektive, die in der Bildmitte eine höhere Auflösung bieten. Dies ist oft dadurch bedingt, dass höchstauflösende Objektive einen sehr kleinen qualitativ guten Bildkreis besitzen.

Das Luminar 25mm besitzt eine Blende von 1:3.5 und somit eine Apertur von 0.15. Die Blendenwerte sind als Verlängerungsfaktor auf dem Objektiv angegeben. Ganz offen = 1, um eine Blende geschlossen = 2. usw., bis zum Belichtungs-Verlängerungsfaktor 30. Die höchste Auflösung in der Bildmitte wird bei offenster Blende erreicht. Da die Luminare bei unterschiedlichen Abbildungsmassstäben eingesetzt werden und somit ein unterschiedlich grosser Bildausschnitt seines Bildkreises genutzt wird, ist der Ort der Bildecken bei unterschiedlichem Abbildungsmassstab immer an einem anderen Ort im Bildkreis des Objektivs. Spricht man somit von der Bildqualität in den Ecken, ist immer der Abbildungsmassstab und die Chipgrösse zu berücksichtigen.

Die Bildmitte ist unabhängig vom Abbildungsmassstab immer am selben Ort. Je stärker in einem gewissen Bereich vergrössert wird, umso höher ist in der Bildmitte die Auflösung. Am höchsten ist dies beim Luminar 25mm der Fall, wenn die Blende ganz offen, also auf Stellung 1 steht. Zu bedenken ist, dass der abgebildete Bildausschnitt mit steigender Vergrösserung immer kleiner wird.

Bei doppelter Vergrösserung sinken die Bild-Seitenlängen auf die Hälfte, jedoch steigt die Auflösung nicht auf das Doppelte. Somit wird der gut aufgelöste Bildinhalt bei steigender Vergrösserung (Abbildungsmassstab) immer geringer.

Das Luminar besitzt, wie jedes Objektiv, einen Bildkreis der zum Rand hin immer schlechter in der Abbildung wird. Stellt man die Forderung, dass die Auflösung in den Bildecken maximal auf 85% des Wertes in der Bildmitte absinken darf, dann ist dies beim Luminar 25mm an der Nikon D810 (Vollformat) bei einem Abbildungsmassstab von 5:1 der Fall. Bei 4:1 ist der Auflösungsabfall in den Bildecken höher und es ist eine störende Abschattung (Vignettierung) in den Bildecken sichtbar.

Der kleinste Abbildungsmassstab bei welchem das Luminar 25mm an einer Vollformat Kamera erfolgreich eingesetzt werden kann, beträgt somit 5:1.

Betrachten wir das Auflösungsvermögen (LP/mm) in der Bildmitte und in den Ecken, bei einer Nikon D810 in Abhängigkeit vom Abbildungsmassstab: Abbildungsmassstab / Auflösung Bildmitte in LP/mm / Auflösung Bildecke in LP/mm / Prozentuale Auflösung in den Bildecken im Vergleich zur Bildmitte (Luminar25 mm).

5:1 / 430 / 360 / 84

6:1 / 450 / 400 / 89

7:1 / 460 / 430 / 94

8:1 / 470 / 470 / 100

9:1 / 475 / 475 / 100

10:1 / 480 / 480 / 100

12:1 / 480 / 480 / 100

15:1 / 480 / 480 / 100

Hieraus wird ersichtlich, dass das Luminar 25mm, so wie jedes andere Objektiv, in diesem Falle an einer Nikon D810, bei steigender Vergrößerung (Abbildungsmassstab) höher auflöst, bis zu einem bestimmten Wert. Im obengenannten Beispiel, bis 480 LP/mm.

Die höchste Auflösung in der Bildmitte des Luminar 25mm, bei oben genanntem Setup, beträgt somit 480 LP/mm, dies bei einem Abbildungsmassstab von 10:1.

Eine Erhöhung des Abbildungsmassstabes erhöht die Auflösung nicht, jedoch wird der Bildausschnitt kleiner, was nachteilig ist.

Ein Luminar 16mm löst bei einem Abbildungsmassstab, bei dem noch keine nennenswerte Abdunkelung in den Bildecken sichtbar ist, das ist bei 8:1, in der Bildmitte mit 650 LP/mm auf. Also etwa 38% höher als das Luminar 25mm. Die höchste Auflösung in der Bildmitte beim Luminar 25mm ist somit bei einem Abbildungsmassstab von 10:1 erreicht, jedoch ist die Auflösung des Luminar 16mm schon bei 8:1 um 38% höher.

Somit wird klar, dass nicht nur das Auflösungsvermögen in der Bildmitte für den optimalen Abbildungsmassstab eines Objektivs entscheidend ist.

Betrachtet man die Bildqualität in den Ecken und stellt da hohe Ansprüche, dann sieht es beim Luminar 25mm folgendermassen aus:

Stellt man an die Qualität des Bildes in den Ecken beim Luminar 16mm den gleichen Anspruch wie beim Luminar 25mm, also eine Auflösung, die in den Ecken noch 85% der Auflösung in der Bildmitte beträgt, dann ist an einer Vollformatkamera das Luminar 16mm erst ab einem Abbildungsmassstab von 12:1 geeignet. Bei 8:1 beträgt die Auflösung des Luminar 16mm in den Ecken nur noch etwa 80%. Sie sinkt somit um 20% zu den Bildecken, was gut sichtbar ist und für eine gleichmässige Auflösung bis in die Bildecken, vor allem für Objekte, die bis in die Ecken reichen, ist dies nicht vorteilhaft.

Fotografiert man runde Objekte, z.B. einen Insektenkopf, dann ist die verminderte Auflösung in den Bildecken kein Nachteil. Um die Qualität eines Objektivs zu bezeichnen und zu entscheiden, ob es geeignet ist, ist somit immer auch massgebend, was man fotografieren möchte.

Der untere geeignete Abbildungsmassstab ist erreicht, wenn die Auflösung in den Ecken im Vergleich zur Mitte, etwa 85% beträgt.

Wird der Abbildungsmassstab erhöht, wird die Differenz zwischen Mitte- und Randauflösung geringer.

Der obere geeignete Abbildungsmassstab ist erreicht, wenn die Auflösung nicht mehr nennenswert zunimmt.

Hier noch einmal die Werte der Auflösung in den Bildecken, bei einem Luminar 25mm an einer Nikon D810 (Vollformat):

Abbildungsmaßstab / Auflösung in den Bildecken als LP/mm / Prozent der Auflösung in der Bildmitte:

5:1 / 360 / 84

6:1 / 400 / 89

7:1 / 430 / 93

8:1 / 470 / 100

9:1 / 475 / 100

10:1 / 480 / 100

12:1 / 480 / 100

15:1 / 480 / 100

Hieraus wird ersichtlich, dass ab 8:1 eine gleichmässige Auflösung, von Bildmitte bis Bildecken erreicht wird, was vor allem wichtig ist, wenn das Objekt bis in die Bildecken reicht und deshalb auch in den Bildecken optimal abgebildet werden soll. Betrachtet man den Bildinhalt, der so viel wie möglich sauber aufgelöste Details (LP/ Bildfläche) enthalten soll, dann spielt der Abbildungsmaßstab eine wichtige Rolle. Je weniger vergrössert wird, umso reichhaltiger der Bildinhalt. Bei doppelter Vergrösserung, steigert sich die Auflösung in der Bildmitte beim Luminar 25mm nur um 12%, dies bei Halbierung der Seitenlängen und einem Viertel der Bildfläche. Das Bild wird somit an Details ärmer.

(Zeiss Luminar 25mm bei 5:1 = 430 LP/mm und bei 10:1 = 480 LP/mm.)

Verwendet man für den doppelten Abbildungsmaßstab ein Objektiv, das stärker vergrössert, sieht es etwas besser aus. Da steigert sich die Auflösung um etwa 60%.

(Zeiss Luminar 25mm bei 5:1 = 430 LP/mm und Zeiss Luminar 16mm bei 10:1 = 680 LP/mm.).

Doch auch in diesem Falle wird das Bild an Details ärmer, obwohl es kleinere Details zeigt.

Aus diesen Gegebenheiten ist es somit sinnvoll, so wenig wie möglich zu vergrössern.

Das Zeiss Luminar 25mm an einer Nikon D810 ist somit bei einem Abbildungsmaßstab von 5:1 bis 8:1 am erfolgreichsten einzusetzen.

Bei einer Vollformatkamera kann bei der Verwendung von Mikroskopobjektiven die Auflösung in den Ecken ohne weiteres auf 50% absinken und eine Abdunkelung (Vignettierung) in den Bildecken sichtbar sein.

Bei einer Kamera mit Crop-Faktor 2 oder 1.5 können im Bereich bis 10:1 Mikroskopobjektive Sinn machen, da die Problematik der schlechten Abbildung am Rand, bedingt durch die Ausnutzung eines kleineren Bereiches des Bildkreises, nicht so stark auftritt.

Kommen wir nun zum eigentlichen Thema dieses Abschnittes: "Ablenden" Alle oben angegebenen Werte beziehen sich auf die voll geöffnete Blende, also Stellung 1 beim Luminar 25mm.

Wie sieht es aus, wenn abgeblendet wird, also die Blende leicht geschlossen wird. In der Bildmitte ist die Situation klar, beim Schliessen der Blende um einen halben Wert sinkt die Auflösung in der Bildmitte um etwa 1.5%, bei einer Blende um 4%, bei zwei Blenden um 8%, bei 3 Blenden um 20% und bei 4 Blenden um 40%. In der Bildmitte ist beim Ablenden immer mit einem Auflösungsverlust zu rechnen.

So ist es auch im Randbereich, also in den Ecken. Die höchste Auflösung ist bei offener Blende.

Ich erwähne dies hier, weil sich dies bei anderen Objektiven, z.B. Reiprojektiven, anders verhält.

Beim Rodenstock Apo-Rodagon 1:2.8 f=50mm in Retro und einem Abbildungsmaßstab von 1.5:1 beträgt die Auflösung, gemessen an einer Nikon D810, in der Bildmitte sowohl mit eingestellter Blende 4 wie auch 5.6, 150 LP/mm. Jedoch in den Bildecken ist sie bei f= 4 bei 100 LP/mm und bei Blende 5.6 beträgt sie 125 LP/mm. Dies ist sichtbar und da die Auflösung in der Bildmitte identisch ist, sollte bei 1.5:1 das Rodagon auf Blende 5.6 abgeblendet werden.

Beim Luminar 25mm bringt ein Abblenden keine verbesserte Bildqualität, auch nicht in den Ecken, während sich beim Rodagon beim Abblenden von 4.0 auf 5.6 die Auflösung in der Bildmitte nicht sichtbar ändert, jedoch am Bildrand und in den Ecken um einiges sichtbar besser wird.

Dieses Verhalten beim Rodagon tritt auch bei vielen Repro- und Fotoobjektiven auf, weshalb sich da ein Abblenden positiv bemerkbar machen kann.

Ich möchte aber betonen, dass damit nicht ein Abblenden um eine Stufe von der grössten Öffnung des Objektivs gemeint ist, sondern, wenn ein Objektiv in der Bildmitte, sowohl bei Blende 4.0 wie auch 5.6 maximal auflöst, der Blende 5.6 der Vorzug zu geben ist, da dann die Auflösung am Bildrand höher ist als bei Blende 4.0.

Die Erfahrung eines Fotografen zeigt, dass es einen positiven Effekt auf die Bildqualität hat, wenn beim Fotografieren, am Reprintstand und zur analogen Zeit am Vergrößerungsgerät, um 1-2 Blenden abgeblendet wurde. Dies trifft bei den Luminar-Lupenobjektiven nicht zu.

Der Mikroskopiker käme nie auf die Idee, dass bei einem Objektiv mit Mikroskop-Anschluss und somit auch bei einem Luminar, sich die Bildqualität steigern würde, wenn er abblendet, ausser er lässt sich von einem Fotografen beraten und somit irreleiten.

Luminare vor 105mm Makro-Fotoobjektiv

Wird das Luminar 25mm vor ein 105mm Makro-Fotoobjektiv montiert, erhöht sich die Auflösung um 30%.

Wird bei 8:1 ein Luminar 16mm verwendet, dann erreicht man eine Auflösung, die um 40% höher ist als mit dem Luminar 25mm bei 8:1 ohne 105mm Fotoobjektiv.

Die Methode mit dem 105mm Fotoobjektiv empfiehlt sich nur, wenn man kein Luminar oder entsprechendes Objektiv mit einer höheren Vergrößerung besitzt!

Blendenwert, Brennweite, Blendendurchmesser:

Blendenwert = Brennweite / Blendendurchmesser

Blendendurchmesser = Brennweite / Blendenwert

Brennweite = Blendenwert X Blendendurchmesser

Beispiel:

Luminar 25mm 1:3.5

Blendendurchmesser = 25mm / 3.5 = 7.14mm

Zum Verständnis:

Der Blendenwert 1:3.5 ist gleichbedeutend mit Blende 3.5

Blendenwert = Blende

Brennweite, wenn zwei Objektive hintereinander montiert werden.

Formel für EXCEL:

=1/((1/Brennweite 1.Objektiv)+(1/Brennweite 2.Objektiv))

Beispiel:

Ein Luminar 25mm 1:3.5 wird auf ein Fotoobjektiv mit Brennweite 105mm aufgesetzt.

Brennweite = $1 / ((1/25)+(1/105)) = 1 / (0.04+0.0095) = 1 / 0.0495 = 20.2\text{mm}$

Die Brennweite dieser Kombination beträgt 20.2mm.

Bei grösserem Blendenwert erhöht sich in diesem Bereich die Auflösung.

Wird nun das Luminar 25mm 1:3.5 auf ein 105mm Objektiv mit offenster Blende aufgesetzt, dann beträgt die Brennweite der Kombination 20.2mm.

Da sich der Durchmesser in Millimeter der Blende des Luminars nicht verändert hat, ist somit der Blendenwert kleiner.

Beim Luminar 25mm 1:3.5 mit Linsendurchmesser 7.14mm, beträgt der Blendenwert:
 $25\text{mm} / 7.14 = 3.5$.

Bei der Kombination Luminar 25 mit 105mm Objektiv, rechnet sich:

$20.2\text{mm} / 7.14 = 2.83$

Mit der Kombination erhält man ein "Luminar 20.2mm 1:2.83".

Ein Blendenwert von 2.83 löst höher auf als Blende 3.5!

Zum Verständnis:

Der Blendenwert 1:3.5 ist gleichbedeutend mit Blende 3.5

Blendenwert = Blende

Es ist absolut normal, dass bei Objektiven in Retro (ZEISS Luminar), sich durch eine kleinere Brennweite (25mm --> 20mm) der Abbildungsmaßstab erhöht, also die Vergrößerung sich erhöht, sich dadurch "hoffentlich" auch die Auflösung erhöht und der Bildausschnitt dadurch kleiner wird.

Alles völlig normal und nicht aussergewöhnlich.

Der Gewinn an Auflösung, ist aber im Vergleich zum Verlust an Bildbreite gering.

Focus-Stacking 1:1 bis 9:1 mit Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven

Erwähnte Objektive:

Vergrößerungsobjektive:

Schneider-Kreuznach Componar 4.5/75
Schneider-Kreuznach Componon-S 2.8/50
Schneider-Kreuznach Componon 4/28
Rodenstock Apo-Rodagon 1:2.8 f=50mm
Rodenstock Apo-Rodagon N 1:2.8 f=50mm
Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8

Fotoobjektive:

Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D

Lupenobjektive:

ZEISS Luminar 100mm 1:6.3
ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11
ZEISS Luminar 40mm 1:4/A0.13
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15
ZEISS Luminar 16mm 1:2.5/A0.2

Mikroskopobjektive:

NIKON CF Plan 5X/0.15 c ∞/0 BD DIC WD 12.0
NIKON BD Plan 5/0.1 210/0
Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3//0.16 160/-
Reichert Austria 10/0.25 160/-
Nikon M Plan 10/0.25 210/0
NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17

Ich berichte über Objektive, die für Auflichtfotografie und Focus-Stacking mehr oder weniger geeignet sind.

Die Fotografie stellt einen hohen Anspruch, nicht nur an die Bildqualität in der Bildmitte, sondern auch am Bildrand und den Ecken.

Focus-Stacking vereint unterschiedliche Schärfeebenen aus mehreren Bildern in einem Bild. Es ist somit von Objektivseite keine möglichst hohe Schärfentiefe gefordert, sondern eine möglichst hohe Auflösung.

Als Fotoapparat dienen digitale Spiegelreflexkameras (DSLR) mit Crop-Faktor (Nikon D7100) und Vollformat (Nikon D810). Diese können auch für die normale Fotografie verwendet werden und müssen deshalb nicht nur für die beschriebene Anwendung allein angeschafft werden.

Das folgend Beschriebene lässt sich nicht unverändert auf Kameras übertragen, deren Chipgrösse von den oben genannten Kameras stark abweicht.

Es ist nicht Sinn der Sache, hier nur das am höchsten auflösende Objektiv zu nennen, sondern zu zeigen, wie sich Objektive bei unterschiedlichem Abbildungsmaßstab unterscheiden und wie sie bei unterschiedlichem Objekt optimal einsetzbar sind. Ebenfalls wird der mechanisch-optische Aufbau (Setup) mit seinen unterschiedlichen Problemen erwähnt. Wichtig bei der Auflichtfotografie ist ebenfalls die Berücksichtigung der Lichtsetzung.

Es sind somit auch die äusseren Umstände und Möglichkeiten beschrieben.

Ein Beispiel:

Bei 8:1 löst das Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N sowohl in der Bildmitte, als auch in den Ecken mit einer Vollformatkamera 630 LP/mm auf. Der freie Arbeitsabstand beträgt 36mm, dies erlaubt eine gute Beleuchtung. Bis jetzt habe ich noch nie ein Objektiv ausgemessen, das bei 8:1 und diesem freien Arbeitsabstand besser auflöste. Das Zeiss Luminar löst ähnlich hoch auf, besitzt aber einen freien Arbeitsabstand von nur 10mm, was nur eine eingeschränkte Beleuchtung zulässt und die Auflösung sinkt in den Ecken auf etwa 80%. Je nach Objekt ist dies kein Hindernis. Beim Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N kann es aber ein Hindernis sein, dass dazu zwischen Sensorebene der Kamera und Objektivanschluss 445mm Balgen oder/und Zwischenringe nötig sind. Das Zeiss Luminar benötigt dazu nur 120mm Balgen oder/und Zwischenringe. Welches Objektiv nun besser ist, oder besser geeignet ist, kommt auf die Möglichkeiten in der Anwendung an.

Ich versuche hier einigermaßen kostengünstige Lösungen zu besprechen, die in ihrer Anwendung unkritisch, einfach, gut und leicht nachvollziehbar sind. Es benötigt keine extrem teuren Objektive, jedoch einiges an Zwischenringen oder/und Balgen. Ich erwähne hier vorwiegend Ergebnisse und Zusammenhänge, die ich in der Praxis erprobt habe. Ich empfehle die Mitgliedschaft im Makro-Forum (www.makro-Forum.de), im Mikroskop Forum (<http://www.mikroskopie-forum.de>), im speziell für Fokus-Stacking geeignetem Forum (<http://www.focusstackingforum.de>) und vergleichbaren Foren. Eine Buchempfehlung kann ich nicht abgeben, da das hier beschriebene nur bruchweise in Büchern zu finden ist.

Man muss sich bewusst sein, dass man Bilder anfertigen will und nicht nur mit dem Auge kleinste Details beobachten will. Zur Beobachtung kleinster Objekte sind Mikroskope geeignet. Da Mikroskope auf einem Tisch Platz finden sollen, ist ihre äussere Grösse begrenzt. Mikroskopobjektive sind auf diese Situation bestens angepasst. Es ist auch möglich, vom Gesehenen Bilder zu dokumentarischen Zwecken anzufertigen. All dies hat nur bedingt mit dem hier beschriebenen Ziel, der Anfertigung von hoch aufgelösten, gestalterisch ansprechenden Bildern zu tun!

Um qualitativ gute Bilder zu einem vernünftigen Preis herzustellen, benötigt es eine passende Kamera. Aus Kostengründen ist es sinnvoll eine Kamera zu wählen, die auch für die alltägliche Fotografie geeignet ist, also eine Kamera mit Wechselobjektiven. Hier merkt man schon, dass ich nicht von der Idee des Vergrösserns ausgehe und dann zu sehen, was das Ergebnis ist, sondern ich versuche die Situation vom gewünschten Bild über die Kamera in Richtung passendem Objektiv zu gehen. Um es gleich vorweg zu nehmen: eine digitale Vollformat-Spiegelreflexkamera (DSLR) sorgt für die besten Bilder im Bereich 1:1 bis 9:1. Möchte man mit derselben Kamera auch Bilder im Bereich von 10:1 bis 60:1 anfertigen, dann reicht eine DSLR mit Crop-Faktor um die 1.5. Will man nur Bilder im Abbildungsmaßstab von 10:1 bis 100:1 anfertigen, ist eine Kamera mit Crop-Faktor 2 oder kleinerem Chipformat zu empfehlen.

Da hier auch die Rede von 1:1 bis 9:1 sein soll, beziehe ich mich auf eine Vollformatkamera.

An dieser Stelle noch eine klare Begründung für diese Wahl der Ausrüstung.

Zuerst die Nachteile von Mikroskopobjektiven in diesem Bereich. Mikroskopobjektive sind extreme Spezialisten, sie verfügen weder über eine Möglichkeit auf unterschiedliche Entfernung die maximale Schärfe einzustellen, sie besitzen nur selten eine veränderliche Blende und sie können nur einen bestimmten Abbildungsmaßstab in guter Qualität

abbilden. Alles ist so optimiert, dass nur der vorgesehene Gebrauch optimal ist, dieser aber in höchster Qualität. So ist es nicht verwunderlich, dass bei 5:1 ein Mikroskopobjektiv in der Bildmitte höher auflösen kann als ein Lupen- oder Vergrößerungsobjektiv. Da beim Mikroskopieren der gewünschte Bereich in die Bildmitte gerückt werden kann, ist die Abbildungsleistung und somit auch die Auflösung in den Bildecken nicht so entscheidend und kann deshalb um einiges schlechter als bei Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven sein. Ebenfalls ist der Bildkreis eines Mikroskopobjektivs sehr klein, er bewegt sich zwischen 20 bis 30mm. Eine Kamera mit Formatfaktor 2 (Crop-Faktor 2) besitzt einen Chip in der Grösse von 17.3 x 13.0mm, also eine Diagonale von 21.3mm und ist somit für Mikroskopobjektive bestens geeignet.

Eine Crop-Kamera mit dem Formatfaktor 1.5 oder 1.6, also APS-C, besitzt einen Chip im Format von etwa 22.5 x 15.0mm und somit einer Diagonale von 27mm was für einige Mikroskopobjektive (um 20mm) schon knapp wird. Suboptimal ist eine Vollformatkamera mit Chipgrösse 36 x 24mm, denn diese besitzt mit einer Diagonale von 43.3mm für Mikroskopobjektive (Bildkreis 20-30mm) einen viel zu grossen Chip. Natürlich kann das Mikroskop-Objektivbild auf dieses Format vergrössert werden, dies setzt aber eine zusätzliche Linse voraus, die die Bildqualität allerdings nicht verbessert.

Die Auflösung bleibt beim nachträglichen Vergrössern immer noch gleich oder sinkt leicht ab, höher kann sie nicht werden, denn was nicht da ist, kann auch nicht herbeigezaubert werden. Also kein idealer Weg. Nicht zu vergessen ist, dass Mikroskopobjektive um einiges teurer sind als Lupen- oder Vergrößerungsobjektive.

Das Bild einer Vollformatkamera kann jedoch nach Bedarf beschnitten werden.

Mikroskopobjektive wurden für die Betrachtung mit dem Auge und einem Gerät (Mikroskop) mit Standardabmessungen berechnet und hergestellt und nicht speziell für die Fotografie.

Der Fotograf möchte ein natürliches Objekt mit einer bestimmten Grösse formatfüllend fotografieren, der dazu notwendige Abbildungsmassstab ist eine sekundäre Folge davon. Es ist deshalb irreführend, wenn bei einem bestimmten Abbildungsmassstab Kameras mit unterschiedlicher Chipgrösse verglichen werden. So kann auch die Äusserung, dass mit einer Vollformatkamera, bedingt durch ihre geringere Schärfentiefe ein Objekt besser freigestellt werden kann, etwas verwirren. Denn oft wird daraus geschlossen, dass die Vollformatkamera eine geringere Schärfentiefe besitzt. In Wirklichkeit, muss aber mit einer Vollformatkamera, um den gleichen Bildausschnitt zu erhalten wie mit einer Crop-Kamera, stärker optisch vergrössert werden, was dadurch zu einer kleineren Schärfentiefe führt.

Chipformat:

Der Abbildungsmassstab eines Objektivs ist mit seinem Auflösungsvermögen verknüpft. Anschliessend, nur als Beispiel in etwa die fiktive Auflösung in LP/mm bei unterschiedlichem Abbildungsmassstab:

1:1 = 100

2:1 = 200

3:1 = 300

4:1 = 400

5:1 = 500

6:1 = 600

7:1 = 700

8:1 = 800

9:1 = 900

10:1 = 1000

20:1 = 1250

40:1 = 1800

60:1 = 2400

100:1 = 2800

Dieses sind in etwa die Werte, die in der Realität nicht genau erreicht werden. Je nach Qualität des Objektivs kann sie von diesen Werten abweichen. Ich nehme sie aber als grobes Mass, um Folgendes verständlicher erklären zu können.

Neben dem Auflösungsvermögen des Objektivs ist auch das der Kamera ausschlaggebend. Ich vergleiche hier Kameras, deren Chip folgende Breite und Pixelpitch besitzen.

Vollformat (Nikon D810), Chipbreite 35.9mm, Pixelpitch 4.9µm

Crop 1.5 Kamera (Nikon D7100), Chipbreite 23.5mm, Pixelpitch 4µm

Crop 2 Kamera (Olympus), Chipbreite 17.3mm, Pixelpitch 3.7µm

Diese Kameras besitzen ein ähnliches Auflösungsvermögen.

Um ein 4.5mm breites Objekt mit den oben erwähnten Kameras formatfüllend zu fotografieren, werden unterschiedliche Abbildungsmassstäbe benötigt.

Vollformat, 35.9mm / 4.5mm = 8, somit 8:1

Crop 1.5 Kamera, 23.5mm / 4.5mm = 5.2, somit 5.2:1

Crop 2 Kamera, 17.3mm / 4.5mm = 3.8, somit 3.8:1

Bedingt durch den unterschiedlichen Abbildungsmassstab und das damit optisch verbundene Auflösungsvermögen, ergibt sich bei den unterschiedlichen Chipformaten die folgende Auflösung:

Vollformat, 8:1, 800LP/mm

Crop 1.5 Kamera, 5.2:1, 520LP/mm

Crop 2 Kamera, 3.8:1, 380LP/mm

Die Vollformatkamera löst somit bei gleicher Bildbreite (4.5mm) aus rein optischen Gründen mehr als doppelt so hoch auf wie eine Crop 2 Kamera.

Wichtig ist jedoch, dass das Objektiv die Chipfläche bis in die Ecken mit einer guten Auflösung ausleuchtet. Dies ist bei Verwendung von Lupen- und Vergrößerungsobjektiven im Bereich von 1:1 bis 8:1 der Fall.

Mit der Vollformatkamera muss im Gegensatz zur Crop 2 Kamera doppelt so hoch vergrössert werden, was natürlich mit einigen "Problemen" verbunden ist. Es benötigt mehr Licht, das bedingt durch den kleineren freien Arbeitsabstand, eine gute Ausleuchtung erschwert. Deshalb sind Objektive mit einem hohen freien Arbeitsabstand und einem kleinen Abschattungswinkel willkommen. Ebenfalls sind bedingt durch die geringere Schärfentiefe bei Focus-Stacking, kürzere Schritte von Bild zu Bild nötig.

Hier die Gegenüberstellung der Bildbreite zu den unterschiedlichen Chipformatbreiten mit dem Abbildungsmaßstab und der dazugehörigen Auflösung.

Bildbreite in mm / Vollformat Kamera, Abbildungsmaßstab und Auflösung / Crop 1.5 Kamera, Abbildungsmaßstab und Auflösung / Crop 2 Kamera, Abbildungsmaßstab und Auflösung.

mm	Abbm. Vollformat	Abbm. Crop Format 1.5	Abbm. Crop Format 2.0
36	1:1 100LP/mm	1:1.5, -	1:2 -
24	1.5:1 150LP/mm	1:1 100LP/mm	1:1.3 -
18	2:1 200LP/mm	1.3:1 130LP/mm	1:1 100LP/mm
9	4:1 400LP/mm	2.7:1 270LP/mm	2:1 200LP/mm
4.5	8:1 800LP/mm	5.3:1 530LP/mm	4:1 400LP/mm
3	12:1 -	8:1 800LP/mm	6:1 600LP/mm
2.2	16:1 -	10.7 1070LP/mm	8:1 800LP/mm

Nicht der Abbildungsmaßstab gilt als Ausgangspunkt, sondern die gewünschte Bildbreite, der Abbildungsmaßstab bei unterschiedlicher Chipgröße ist die Folge!

36 bis 4.5mm (3mm) Bildbreite:

Ersichtlich aus der obenstehenden Liste wird, dass zwischen einer Bildbreite von 36mm bis 4.5mm eine Vollformatkamera mit Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven am höchsten auflöst, das ist bei 1:1 bis etwa 8:1 der Fall.

Bei einer kleineren Bildbreite kann auf eine Crop 1.5 Kamera gewechselt werden, wobei dann keine höhere Auflösung als 800LP/mm erreicht wird. Es kann somit das Vollformatbild mit gleicher Qualität beschnitten werden.

Bei Mikroskopobjektiven an einer Vollformatkamera kann es nötig sein, dass das Bild stark beschnitten werden muss, da die Qualität in den Bildecken mangelhaft ist.

3mm Bildbreite:

Eine Crop Faktor 1.5 Kamera erreicht bei einer Bildbreite von 3mm eine Auflösung von 800LP/mm, das bei 8:1.

Mit einer Crop Faktor 2.0 Kamera wird eine Auflösung von 600 LP/mm erreicht.

2.25mm Bildbreite:

Eine Crop Faktor 2 Kamera erreicht erst bei einer Bildbreite von 2.25mm eine Auflösung von 800LP/mm, dies bei 8:1.

Bei einer kleineren Bildbreite wird erfolgreich auf Mikroskopobjektive umgestellt.

Ich verwende bis zu einer Bildbreite von 3mm eine Vollformatkamera mit Lupen oder Vergrößerungsobjektiven, also bis 8:1 (800LP/mm).

Bei einer gewünschten Objektbreite von 4.5mm bis 2.4mm beschneide ich das 8:1 Vollformatbild, mit Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven (800LP/mm).

(Bei 2.4mm Bildbreite mit einer Crop 2 Kamera ist ein Abbildungsmaßstab von 7.5:1 gefordert, dieser bietet eine Auflösung von 750LP/mm. Diese ist minimal geringer, als wenn mit einer Vollformatkamera bei 8:1 (800LP/mm) das Bild beschnitten wird.

Eine Crop 2 Kamera erreicht eine Auflösung von 800LP/mm erst bei einer noch kleineren Bildbreite von 2.25mm bei 8:1.)

Bei einer Bildbreite von 2.4mm und kleiner wechsele ich zur Crop 1.5 Kamera mit Mikroskopobjektiven, oder beschneide das Vollformatbild.

Bei einer Crop 2 Kamera kann erst bei einer Bildbreite von 1.8mm zu einem 10x Mikroskopobjektiv gewechselt werden und kommt erst dabei in den Genuss von 1000LP/mm.

Der Einsatz von Mikroskopobjektiven im Bereich von 1:1 bis 8:1 ist nur dann sinnvoll, wenn sie genau bei ihrer Nennvergrößerung eingesetzt werden. Besitzen sie einen grossen Bildkreis, z:B. 30mm, dann ist ihr Einsatz an einer Crop 1.5 Kamera erfolgreich, oder das Vollformatbild wird beschnitten. Unterhalb ihrer Nennvergrößerung wird ein qualitativ schlechter Randbereich oder sogar ein Bildbeschnitt sichtbar. Werden sie mit einer längeren Tubuslänge als der Normlänge eingesetzt, wird das Bild stärker vergrössert, also der Bildausschnitt kleiner, jedoch erhöht sich die Auflösung nicht sichtbar, denn Mikroskopobjektive zeigen ihre höchste Auflösung bei der Nennvergrößerung.

Für 5:1 gibt es Mikroskopobjektive, sie können da mit Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven an einer Crop 1.5 Kamera qualitativ mithalten.

Um mit den Mikroskopobjektiven einen gestalterisch passenden Bildausschnitt zu erhalten und da eine optimale Abbildungsleistung mit maximaler Auflösung angestrebt wird, wäre für etwa jeden ganzzahligen Abbildungsmassstab ein Objektiv nötig. Dies ist teuer und das vermehrte Wechseln des Objektivs bei der Auswahl des passenden Ausschnittes, wäre umständlich.

Objektivfassung, Gehäuse:

Während in der Durchlichtmikroskopie die äussere Konstruktion, Linsenfassung und Gehäuse einer Optik nicht von grosser Bedeutung ist, spielt sie bei der Auflicht-Fotografie eine grosse Rolle und ist verknüpft mit dem freien Arbeitsabstand zu bewerten.

Lupenobjektive:

Ich berichte hier auch von Lupenobjektiven, die speziell für Fotografie entwickelt wurden und vergleiche sie mit den Vergrößerungsobjektiven die für die Vergrößerung von Filmnegativ oder -positiv auf Fotopapier hergestellt und berechnet wurden.

Vergrößerungsobjektive:

Montiert an einem Vergrößerungsgerät, projizieren sie das kleine plane Bild eines fotografischen Negativs oder Positivs, das sich in einer Halterung im Vergrößerungsgerät befindet, durch das Vergrößerungsobjektiv aus dem Vergrößerungsgerät hinaus, auf die grössere, plane Fläche des lichtempfindlichen Fotopapiers.

Da Objektive ihre beste Leistung zeigen, wenn sie so eingesetzt werden, wie sie berechnet und konstruiert wurden, ist es notwendig, wenn die Lichtstrahlen in gleicher Richtung durch das Objektiv geleitet werden sollen, dass das Vergrößerungsobjektiv an einem Fotoapparat umgekehrt montiert werden muss. Die umgekehrte Art der Montage nennt man oft auch "Retrostellung" oder kurz "in Retro". Jedoch ist ein Vergrößerungsobjektiv, wenn man es umgekehrt an einer Fotokamera montiert, in Normalstellung montiert und deshalb so zu bevorzugen. Wird ein Fotoobjektiv umgekehrt an einer Kamera montiert, dann ist dies eine Notlösung die nicht dem berechneten Zweck entspricht, hier spricht man richtigerweise von einer Retrostellung.

Bei der Mikroskopie wird ein Bild des Objektes mit einer Diagonale von einem Bruchteil oder wenigen Millimeter auf ein Bild mit einem Durchmesser von 20-30mm vergrössert und projiziert.

Vergrößerungsobjektive projizieren ein Kleinbildnegativ mit einer Diagonale von etwa 43mm auf eine Bildgrösse, dessen Diagonale einen halben Meter oder mehr betragen kann.

Wobei bei der Fotografie mit umgekehrt montiertem Vergrößerungsobjektiv, die Grösse des Objektes dem Kleinbildnegativ und der Sensor der Kamera, der Grösse des Papierbildes entsprechen könnte. Da bei der Fotografie sowohl das Objekt als auch der Chip viel kleiner sind, wird vom Vergrößerungsobjektiv nur der mittlere und am besten aufgelöste und korrigierte Teil des projizierten Bildes verwendet. Richtig eingesetzt sinkt die Auflösung an einer Vollformat Kamera in den Ecken nur unsichtbar und keine chromatische Aberration (CA) ist sichtbar.

Die Auflösung in der Bildmitte ist bei guten Vergrößerungsobjektiven im Massstab bis etwa 8:1 mit der eines Mikroskop Objektivs vergleichbar und in den Ecken, vor allem bei Vollformat Kameras, um einiges höher als bei Mikroskopobjektiven.

Die mechanische Tubuslänge beim Mikroskop, das ist die Distanz von Objektivanschluss bis zum oberen Ende des Okulars, ist standardisiert und beträgt üblicherweise bei einem Mikroskop 160mm, 170mm oder 210mm (jeweils minus 10mm). Sie ist auf die normierte Dimension eines Mikroskops angepasst und somit beschränkt.

Vergrößerungsobjektive können ein Bild auch auf weitere Distanzen, je nach gewünschter Vergrößerung, in guter Qualität projizieren, das kann ohne weiteres ein Meter sein. Die Distanz zwischen Objektiv und lichtempfindlichem Papier oder in unserem Falle bei der Fotografie, von Objektiv bis Chipebene (Sensorebene), kann also ein Mehrfaches der äusseren Dimension eines Mikroskops betragen.

Vergrößerungsapparate sind üblicherweise so konstruiert, dass das Licht von oben aus dem Gerät nach unten zum Fotopapier gelangt, also senkrechter Aufbau. Dies ist auch aus Stabilitätsgründen für die lange mechanische Anordnung besser als ein waagrechter Aufbau. Aus dem Erwähnten wird sichtbar, dass bei Verwendung von Vergrößerungsobjektiven oft mit grossen Distanzen zu rechnen ist. Die grosse Distanz befindet sich zwischen Objektiv und Kamera und muss mit Zwischenringen oder/und Balgen bewerkstelligt werden. Ihre Länge kann bis zu 50cm oder mehr betragen. Beim Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N und einem Abbildungsmassstab von 8:1 (das ist der optimale Abbildungsmassstab dieses Objektivs), beträgt sie etwa 44cm.

Bei den Vergrößerungsobjektiven gibt es beim gleichen Hersteller unterschiedliche Qualitätsstufen, zum Beispiel bei Rodenstock. Das für Amateure preisgünstige dreilinsige Rogonar ist für Schwarzweiss-Anwendung geeignet, oder das etwas teurere und bessere Rogonar-S mit 4 Linsen. Dann das Rodagon, das auch für Farbfotografie geeignet ist. Und dann das teure, bis zu achtlinsige Apo-Rodagon-N, das höchsten, auch farbfotografischen Zwecken gerecht wird.

Ist eine kurze Distanz zwischen Objektiv und Chipebene gefordert, eignet sich das Rodagon-WA mit seiner kürzeren Brennweite.

Speziell gut, bei einem Abbildungsmassstab um 1:1, ist das Apo-Rodagon-D 1x 75mm f/4 und bei 2:1 das Apo-Rodagon-D 2x 75mm f/4,5 geeignet.

Ein gebrauchtes Rogonar oder ein Schneider Componar ist zwar sehr kostengünstig, doch für die Farbfotografie nicht geeignet.

Ein gebrauchtes älteres Apo-Rodagon oder das neuere Apo-Rodagon-N, die ebenfalls preisgünstig sind, eignen sich für die Makrofotografie von 2:1 bis 5:1 (1:1 bis 8:1) hervorragend! An einer Nikon D7100 oder Nikon D810 sorgen sie für Bilder in einer absoluten Spitzenqualität.

Fotoobjektive besitzen durch ihre Eigenschaften einen Charakter. Das eine wirkt klarer und härter, weil es zu einer eher bläulichen Abbildung neigt, das andere ist sanfter und wärmer, weil es eher zu rot tendiert. Diese und andere Charaktereigenschaften können mit der Bildbearbeitung verändert werden. So wird der Charakter auch durch unterschiedliche Wiedergabe der unscharfen Bildbereiche geprägt (z.B. durch den Bokeh Effekt). Da bei gestackten Bildern üblicherweise keine Unschärfe besteht, ist der Charakterausdruck der Unschärfe im Bild nicht sichtbar.

Wichtig ist, dass die hohe Auflösung in der Bildmitte bis in die Ecken erhalten bleibt.

Im Gegensatz zu Fotoobjektiven sind bei Vergrößerungsobjektiven wenig eigene Charakterzüge erwünscht. Vergrößerungsobjektive sollen den Charakter eines Bildes so wenig wie möglich verändern. Sie zeichnen somit sehr neutral. Ein Absinken der Auflösung in den Bildecken ist absolut unerwünscht!

Mikroskopobjektive dienen zum Erkennen von kleinsten Details und Tonwertunterschieden mit dem Auge, es findet somit keine anschließende Bildbearbeitung statt. Sie zeichnen deshalb kontrasthart und eher blautönig. Die Auflösung mit blauem Licht ist höher als mit rotem Licht, dies bedingt durch die kürzere Lichtwellenlänge. Deshalb werden kleinste Details, mit der harten und kalten Darstellung durch das Mikroskopobjektiv, besser vom Auge sichtbar.

Eine möglichst hohe Auflösung ist vorwiegend in der Bildmitte gefordert, der Randbereich, bei Betrachtung mit dem Auge, ist nicht so wichtig. Denn im Gegensatz zu einem gedruckten Bild, kann problemlos ein Bereich des Objektes am Bildrand in die Bildmitte verschoben werden.

Welches Objektiv, bei welcher Blende für welchen Abbildungsmaßstab?

Besitzt man mehrere Lupen- oder Vergrößerungsobjektive möchte man wissen, für welchen Abbildungsmaßstab welches und bei welcher Blende es am besten zu verwenden ist.

Oder welches Objektiv besorgt man sich für einen bestimmten Abbildungsmaßstab und welche Blende sollte es besitzen.

Klaren Aufschluss zu diesen Fragen geben Messungen. Kann man diese nicht anfertigen, gibt es grobe Hinweise, was einigermaßen optimal ist.

Folgende Tabelle gibt Hinweise, in welchem Bereich man dienliche Vergleichsaufnahmen anfertigen kann.

1:1, 100mm, $f = 8.0$	6:1, 29mm, $f = 2.4$
2:1, 67mm, $f = 5.6$	7:1, 25mm, $f = 2.0$
3:1, 50mm, $f = 4.0$	8:1, 22mm, $f = 1.8$
4:1, 40mm, $f = 3.2$	9:1, 20mm, $f = 1.6$
5:1, 33mm, $f = 2.8$	10:1, 18mm, $f = 1.6$

Ausser dem 100mm Objektiv, sind alle Brennweiten in Retro zu verwenden.

Die Blendenwerte entsprechen nicht der allgemein gültigen f-Blende, sondern der kritischen Blende, die je nach verwendetem Objektiv unterschiedlich ist.

Objektiv Liste 1:1 bis 60:1

Eine Auswahl von Objektiven

Auflösung mit Nikon D810 gemessen

Meine Bewertung:

Von mir bevorzugte Objektive, mit Rahmen

ROT = bester Wert

- A Blende
- B Distanz Sensor Objektivanschluss X = Objektiv direkt an Kamera
- C Auflösung Bildmitte
- D Auflösung Bildecke
- E Auflösung der Bildecke in Prozent zur Bildmitte
- F Freier Arbeitsabstand
- G Abschattender Objektiv Durchmesser
- H Distanz Objekt zu grösstem abschattenden Objektiv Durchmesser
- I Schattenwurf Winkel

Objektiv	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Bemerkung
		mm	LP/mm	LP/mm	%	mm	mm	mm	°	
1:1										
LAOWA 100mm F2.8 CA-Dreamer Macro 2x	4.0	X	100	95	95	92	69	92	41	
Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D	4.0	X	110	100	91	135	54	135	23	
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:4, f = 80mm	6.7	130	100	95	95	145	50	92	30	
Rodenstock Apo-Rodagon-D 1x, 75mm f/4	4.0	114	100	90	90	114	32	114	16	
Rodenstock Rodagon 1:5.6, f = 105mm	8.0	180	100	100	100	195	32	195	9	
ZEISS Luminar 100mm 1:6.3	6.3	180	100	100	100	125	43	125	20	
ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11	4.5	100	120	60	50	120	24	120	11	
Zhongyi Creator 85mm f/2.8 1-5X S.Macro Mark II	2.8	X	90	90	100	240	62	240	15	
2:1										
LAOWA 100mm F2.8 CA-Dreamer Macro 2x	4.0	X	200	200	100	72	69	72	51	
Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D	4.0	120	180	160	89	90	54	90	33	
Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N	6.7	120	190	160	84	60	50	72	38	
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm	5.6	130	200	200	100	55	50	70	39	
Rodenstock Apo-Rodagon-D 2x 75mm f/4.5	4.5	190	200	190	95	95	35	95	21	
Rodenstock Rodagon 1:5.6, f = 105mm	6.7	280	200	200	100	145	32	145	13	
Schneider Componon-S 2.8/50	5.6	135	200	180	90	62	46	70	36	
ZEISS Luminar 100mm 1:6.3	6.3	280	175	175	100	80	43	80	30	
ZEISS Luminar 40mm 1:4/A0.13	4.0	105	210	180	86	42	24	42	32	
ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11	4.5	165	180	160	89	83	24	83	16	
Zhongyi Creator 85mm f/2.8 1-5X S.Macro Mark II	2.8	X	150	150	100	155	62	155	23	
3:1										
Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	X	320	320	100	43	41	43	51	
Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D	4.0	185	270	250	93	85	54	85	35	Bildqualität mangelhaft
Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N	4.0	175	320	270	84	48	50	60	45	
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm	4.8	180	280	280	100	50	50	65	42	
Schneider Componon-S 2.8/50	4.8	185	280	280	100	54	46	62	41	
ZEISS Luminar 40mm 1:4/A0.13	4.0	145	270	260	96	36	24	36	37	
ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11	4.5	235	250	230	92	70	24	70	19	
Zhongyi Creator 85mm f/2.8 1-5X S.Macro Mark II	2.8	X	220	220	100	120	62	120	29	
4:1										
Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	X	380	370	97	42	41	42	52	
Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D	4.0	265	320	300	94	75	54	75	40	Bildqualität sehr mangelhaft
Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N	4.0	225	400	360	90	45	50	57	47	
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm	4.0	225	360	350	97	46	50	61	45	
Schneider Componon-S 2.8/50	4.8	230	370	370	100	48	46	56	45	
ZEISS Luminar 40mm 1:4/A0.13	4.0	185	320	320	100	34	24	34	39	
ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11	4.5	285	300	280	93	65	24	65	21	
Zhongyi Creator 85mm f/2.8 1-5X S.Macro Mark II	2.8	X	270	270	100	105	62	105	33	

Objektiv

A B C D E F G H I
mm LP/mm LP/mm % mm mm mm °

5:1

Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	X	450	420	93	41	41	41	53
Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D	4.0	330	380	340	89	70	54	70	42
NIKON BD Plan 5/0.1 210/0	5.0	210	360	260	72	20	27	28	51
NIKON CF Plan 5X/0.15 c ∞/0 BD DIC WD 12.0	3.3		500	250	50	12	34	19	84
Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N	3.4	280	480	440	92	42	50	54	50
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm	3.4	275	450	450	100	44	50	59	46
Schneider Componon-S 2.8/50	3.4	280	450	450	100	45	46	53	47
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15	3.5	140	430	370	86	19	24	19	65
ZEISS Luminar 40mm 1:4/A0.13	4.0	235	360	350	97	34	24	34	39
ZEISS Luminar 63mm 1:4.5/A0.11	4.5	355	340	320	94	64	24	64	21
Zhongyi Creator 85mm f/2.8 1-5X S.Macro Mark II	2.8	X	300	300	100	88	62	88	39

Bildqualität sehr mangelhaft
Viele CA Anpassung mangelhaft

6:1

Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	71	490	450	92	38	41	38	57
Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N	2.8	325	540	520	96	40	50	52	51
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm	3.4	325	510	490	96	42	50	57	47
Schneider Componon-S 2.8/50	3.4	335	450	450	100	43	46	51	49
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15	3.5	165	450	400	89	17	24	17	70

7:1

Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	96	560	500	89	38	41	38	57
Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm	3.4	370	550	530	96	40	50	55	49
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15	3.5	190	460	440	96	16	24	16	74

8:1

Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	122	550	520	95	38	41	38	57
ZEISS Luminar 16mm 1:2.5/A0.2	2.5	120	650	520	80	10	24	10	100
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15	3.5	210	470	470	100	16	24	16	74

9:1

Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro	2.8	147	560	530	95	37	41	37	58
ZEISS Luminar 16mm 1:2.5/A0.2	2.5	140	660	530	80	10	24	10	100
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15	3.5	235	475	475	100	16	24	16	74

Objektiv

A B C D E F G H I
mm LP/mm LP/mm % mm mm mm °

Nachfolgende sind Mikroskop Objektive:
Bei 6.3:1 Objektiv an Nikon D7100 gemessen
6.3:1

Carl Zeiss Jena SEMPLAN 6.3//0.16 160/- 3.1 145 600 550 92 8.5 17 8.5 90

Bei 10:1 Objektive an Nikon D7100 gemessen
10:1

NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17	1.7	160	1050	1000	95	9	18	10	84
Nikon E Plan 10/0.25 160/- ganz in silber	2.0	150	930	710	76	2	9	2	132
Nikon E Plan 10/0.25 160/- schwarz/silber	2.0	140	900	700	78	5	8	5	77
Nikon M Plan 10/0.25 210/0	2.0	210	850	700	82	9	24	12	90
Reichert Austria 10/0.25 160/-	2.0	160	750	600	80	7	9	7	65
ZEISS Luminar 16mm 1:2.5/A0.2	2.5	150	680	550	81	10	24	10	100
ZEISS Luminar 25mm 1:3.5/0.15	3.5	260	480	480	100	16	24	16	74

Folgend mit Nikon D810 gemessen

10:1

MITUTOYO M Plan Apo 10X/0.28 ∞/0 f=200	1.79		950	800	84	34	30	32	50
--	------	--	-----	-----	----	----	----	----	----

20:1

MITUTOYO M Plan Apo 20X/0.42 ∞/0 f=200	1.19		1400	1100	79	20	24	20	62
--	------	--	------	------	----	----	----	----	----

Folgend mit Nikon D7100 gemessen

20:1

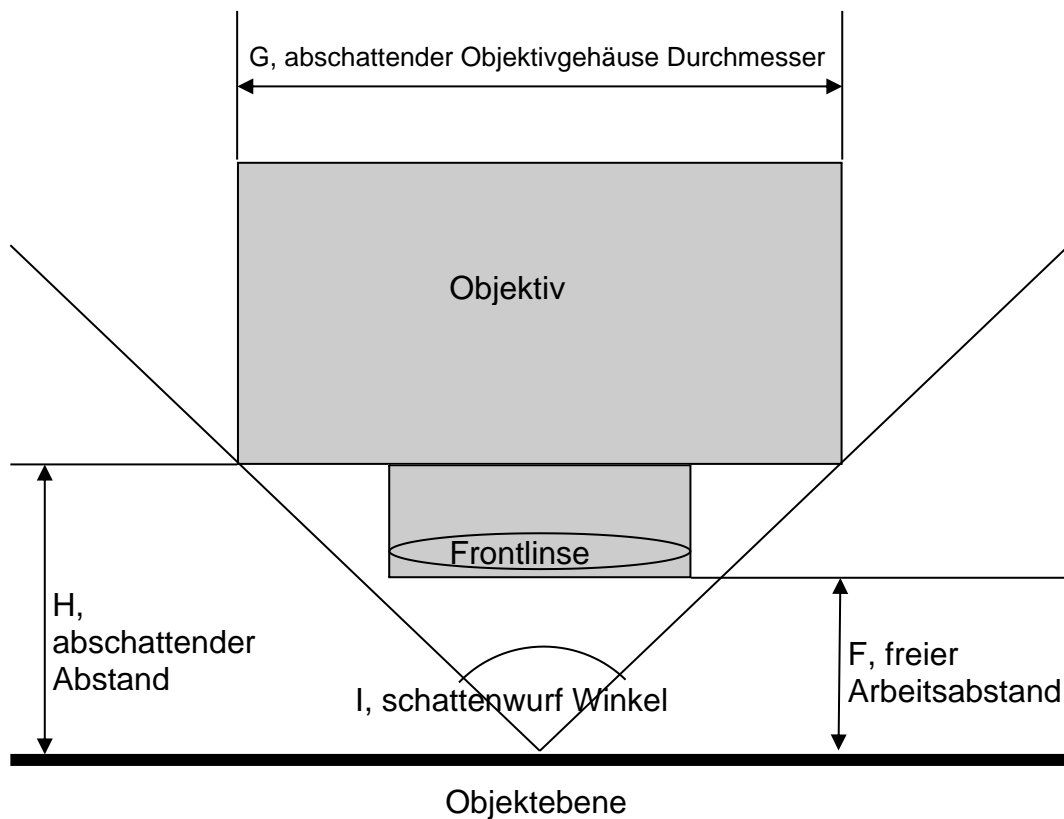
Nikon M Plan 20/0.4 ELWD 210/-	1.25		1350	1300	96	10	13	10	66
Nikon M Plan 20/0.4 LWD 210/-	1.25		1400	1000	71	6	13	6	95

40:1

Nikon M Plan 40/0.5 ELWD 210/0	1.0		1800	1400	78	10	24	14	81
--------------------------------	-----	--	------	------	----	----	----	----	----

60:1

Nikon M Plan 60/0.7 210/0	0.7		2250	2000	89	5	10	5	90
---------------------------	-----	--	------	------	----	---	----	---	----



Spalte A zeigt die Blende, die am Objektiv eingestellt ist.

Spalte B zeigt die nötige Distanz zwischen Objektivanschluss und Sensorebene der Kamera. Diese Distanz minus Auflagemass der Kamera, muss mit Zwischenringen oder/und Balgen erreicht werden.

Bei 9:1 sieht man deutlich, dass das Luminar 16mm mit nur 140mm Balgen oder/und Zwischenringen auskommt und beim EL-NIKKOR 50mm werden etwa 3,5-mal mehr benötigt, das sind 490mm. Wer bei 9:1 eine hohe Auflösung bis in die Ecken wünscht und zugleich eine gute Beleuchtungsmöglichkeit, verwendet deshalb 490mm Balgen oder/und Zwischenringe mit dem EL-NIKKOR 50mm.

Spalte C zeigt die maximale Anzahl Linienpaare die innerhalb eines Millimeters des realen Objektes durch das Objektiv in der Bildmitte aufgelöst werden können. Die Auflösung wird anhand eines Zebramusters ermittelt und ein Linienpaar besteht aus einem schwarzen und einem weissen Strich. Im Idealfall sind dazu mindestens zwei Sensorpixel nötig.

Spalte D zeigt die Auflösung in der Bildecke, diese sollte in der Fotografie annähernd so hoch sein wie die Auflösung in der Bildmitte und nicht unter 80% absinken.

Spalte E zeigt die prozentuale Auflösung in den Bildecken im Vergleich zur Bildmitte.

Spalte F zeigt den freien Arbeitsabstand in Millimeter. Es ist die Distanz zwischen dem scharfen, fokussierten Teil des Objektes und der lichtabschattenden Fassung der Frontlinse. Um eine gute Beleuchtung zu bewerkstelligen, sollte diese so hoch wie möglich sein. Je grösser sie ist, umso geringer ist beim Focus-Stacking die perspektivische Veränderung von Bild zu Bild.

Spalte G zeigt den Durchmesser in Millimeter des massgeblich an der Abschattung beteiligten Objektivdurchmessers an. Dieser limitiert die Möglichkeit, das Objekt frontal zu beleuchten. Vor allem bei Objekten mit tiefen Einbuchtungen und Löchern, kann steiler und deshalb besser ausgeleuchtet werden.

Spalte H zeigt die Distanz zwischen dem scharfen, fokussierten Teil des Objektes zum abschattenden Objektivgehäuse-Durchmessers an. Oft entspricht der freie Arbeitsabstand dem Abstand zwischen dem scharfen, fokussierten Teil des Objektes und dem abschattenden Objektivgehäuse-Durchmessers. Spalte F und Spalte H sind dann identisch.

Spalte I zeigt in Winkelgraden den abschattenden Winkel an. Er wird mit den Werten in Spalte G und Spalte H berechnet und sollte für eine gute Beleuchtungsmöglichkeit so klein wie möglich sein. Der Winkel wurde in EXCEL mit folgender Formel berechnet:
$$=ARCTAN(((\text{Objektiv Durchmesser}/2)/\text{Distanz zu Abschattungsdurchmesser}))*180/PI()*2$$

Ein Problem, das weder der "normale" Fotograf, noch der Mikroskopiker der Durchlicht-Beleuchtung anwendet kennt, tritt bei der Makroskopischen Auflicht-Beleuchtung ein, es ist die Abschattung des Objektes durch das Objektiv.

Der Durchmesser des Luminar 25mm ist mit 24mm um einiges geringer als der des APO Rodagon N 50mm, denn dieser beträgt 50mm. Es könnte vermutet werden, dass die

Beleuchtungsmöglichkeit deshalb beim Luminar besser sei, also die Abschattung durch das Objektiv geringer.

Bei 5:1 schattet das Luminar mit seinem kleinen Durchmesser von 24mm und seinem kurzen freien Arbeitsabstand von 19mm in einem Winkel von 65° ab. Das Rodagon mit seinem grossen Durchmesser von 50mm und seinem grösseren freien Arbeitsabstand von 44mm, schattet nur in einem Winkel von 46° ab, dies lässt beim Rodagon eine bessere Beleuchtung zu.

Klar wird dies auch bei 9:1, dem Luminar 16mm und dem EL-NIKKOR 50mm sichtbar. Das EL-NIKKOR 50mm bewirkt eine Abschattung im Winkel von 55° während das Luminar mit 100° abschattet.

Der Durchmesser eines Objektivs muss bei der Beleuchtung immer in Bezug zum freien Arbeitsabstand betrachtet werden und umgekehrt.

Ein gestacktes Bild besitzt im gestackten Bereich der Schärfe keine perspektivischen Eigenschaften, es ist flach wie eine Flunder. Im scharf abgebildeten Bereich ist an jedem Punkt des Bildes der freie Arbeitsabstand gleich gross und alle Einstellungen an Objektiv und Kamera, also der ganze optische Weg, identisch. Es ist deshalb für den natürlichen Eindruck des Bildes förderlich, wenn mit einem leichten seitlichen Licht eine leichte Schattenbildung erzeugt wird. Dadurch bekommt das Bild einen natürlichen, perspektivischen Ausdruck. Dies kann zusätzlich ebenfalls mit der entsprechenden Bildbearbeitung unterstützt werden.

Mikroskopobjektive

Die folgenden Zeilen richten sich in erster Linie an den Fotografen, der Mikroskopobjektive ohne Okular, aber mit Zwischenringen oder Balgen an der Kamera anschliesst.

Allgemein:

- Bei Mikroskopobjektiven ist die Blende (Apertur) und die Arbeitsdistanz (freier Arbeitsabstand) fest gegeben.
 - Mikroskopobjektive sind Festbrennweiten-Objektive.
 - Das Auflagemass der Fotoobjektive (Nikon 46.5mm) ist um ein Vielfaches geringer als bei Mikroskopobjektiven (Nikon M Plan, 210mm). Dies ist bei der korrekten Montage zu berücksichtigen und mit Zwischenringen oder Balgen zu bewerkstelligen.
 - Der Bildkreis mit einer guten Abbildungsqualität ist bei Vollformat-Fotoobjektiven etwa 43mm und bei Mikroskopobjektiven um einiges kleiner. Beim Mikroskopobjektiv beträgt er normalerweise lediglich 20mm, dies entspricht etwa einer Chipgrösse 4/3" (17.3 x 13.0mm) Crop-Faktor 2.0 Kamera.
- Bei Vollformat und Crop 1.5 oder 1.6 Kameras ist der Randbereich der Bilder bei Verwendung von Mikroskopobjektiven mangelhaft!
- Mikroskopobjektive sind nicht speziell für Fotografie gerechnet (z.B. mangelhafte Randauflösung), nur wenige eignen sich zur Fotografie (geeignet sind z.B. Nikon M Plan Objektive).
 - Das Absinken der Auflösung zum Rand ist bei Mikroskopobjektiven stärker als bei Foto- und Lupen- und Vergrößerungsobjektiven.
 - Mikroskopobjektive benötigen zur Korrektur ihrer Abbildungsfehler oft ein passendes Okular.
 - Ein Grossteil der Mikroskopobjektive ist nicht für Auflicht und gewölbte Objekte geeignet.

Aus den oben genannten Gründen sind Mikroskopobjektive nur einzusetzen, wenn beim gewünschtem Abbildungsmassstab kein geeignetes Foto-, Lupen oder Vergrößerungsobjektiv zur Verfügung steht.

Das Einsatzgebiet der Mikroskopobjektive bei Fotografie beginnt deshalb bei einem Abbildungsmassstab von etwa 10:1.

Mikroskopobjektive an Crop- und Vollformatkamera

Um die exakte, heikle und richtige optische Anordnung des Objektivs, Zwischenlinse und Okulars zu umgehen, empfiehlt sich die "direkte Projektion". Dies um Probleme der Zentrierung, Einhalten der Abstände zwischen den Linsen und Linsensystemen, Verschmutzung der erhöhten Anzahl von Linsen, eventuelle Lichteinbusse durch die hohe Anzahl von Linsen, Verminderung der Auflösung und allgemeine Fehlanpassung mit den summierenden Aberrationen der Linsen, die vor allem in den Bildecken sichtbar sind (z.B. chromatische Aberration), zu vermeiden.

Bei der direkten Projektion wird das Bild des Objektivs direkt auf den Kamerachip projiziert. Zwischen Objektiv und Kamerachip befinden sich keine optischen Linsen, die in den Strahlengang eingreifen und ihn somit verändern würden. Dazu sind Objektive nötig, die ein weitgehend voll auskorrigiertes Bild liefern.

Das anschliessend beschriebene funktioniert mit Nikon CF und M Plan Mikroskopobjektiven, die für Auflicht und ohne zwingende Verwendung einer Zwischenlinse oder eines Okulares konstruiert sind, das die restlichen Farbfehler korrigiert.

Ob es mit anderen Mikroskopobjektiven funktioniert, die weitgehend voll auskorrigiert sind, was vor allem den Farbfehler betrifft, muss geprüft werden.

Ich schreibe im folgenden von der direkten Projektion mit:

NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17

NIKON M Plan 10/0.25, 210/0

NIKON M Plan, 20/0.4 LWD, 210/0

NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0

NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0

NIKON M Plan, 100/0.8 ELWD, 210/0

Diese Objektive besitzen einen etwas grösseren Bildkreis als es sonst üblicherweise bei Mikroskopobjektiven (um die 20mm) der Fall ist.

Diese Objektive verwende ich ohne Zwischenlinse an einem Balgen mit mindestens der nominalen, auf dem Objektiv angegebenen Tubuslänge (160mm und 210mm), mit einer Crop Faktor 1.5 Kamera, Chipgrösse 23.5 x 15.6mm (Crop Faktor 1.5) mit etwa 6000 x 4000 Pixeln. Pixelpitch (23.5 / 6000) 0.0039mm (3.9µm). Die Chip-Diagonale beträgt 28.2mm, was für die oben genannten Mikroskopobjektive tauglich ist und Bilder ergibt, deren Auflösung in den Ecken nicht unter 80% der Auflösung in der Bildmitte sinkt. Bei Verwendung einer Vollformatkamera kann ein Bildbeschnitt nötig sein.

Die etwas neuere Nikon D810 (Vollformatkamera) besitzt im Vergleich zur Nikon D7100 einen etwas grösseren Pixelpitch (35.9mm / 7360 Pixel) von 0.00488mm (4.88 µm), mit etwa 50% mehr Pixelfläche. Entsprechend dem Pixelpitch ist ihr Rauschen etwas geringer. Die Chipdiagonale der Nikon D810 beträgt (35.9 x 24mm) 43.2mm, benötigt somit ein Objektiv mit einem Bildkreis, der qualitativ bei 43.2mm noch akzeptabel ist. Dies trifft für die oben genannten Objektive bei Nennvergrösserung jedoch nicht zu! Möchte man die oben genannten Objektive dennoch an der Nikon D810 Vollformatkamera verwenden, dann müsste man, um eine gute Bildqualität zu erhalten, das Bild stark beschneiden und hätte dabei nicht die gleich gute Auflösung wie bei einer Nikon D7100.

Erhöht man nun an der Nikon D810 die Tubuslänge um den Faktor 1.5, dann wird auf dem Vollformatchip der gleich grosse Bildausschnitt abgebildet wie bei der Nikon D7100 (Crop Faktor 1.5). Bei der Nikon D7100 wird die Bildfläche mit (6000x4000) 24MPixeln

aufgezeichnet und bei der Nikon D810 mit (7360x4912) 36MPixel. Dies hat den Vorteil, dass z.B. an einem Schwarz/Weiss-Übergang mehrere Pixel beteiligt sind und auch die Retusche exakter ausgeführt werden kann und sofern man nur eine Nikon D810 Vollformatkamera besitzt, diese bestens verwendet werden kann. Sowohl die Messdaten, wie auch das Aussehen der Striche auf dem Messtarget (Zeiss Auflösungstest-Objekt 3000) sind in Bildmitte und Ecken sehr gut, ebenfalls die Bilder, die mit dem verlängerten Tubus angefertigt wurden.

Die oben genannten Mikroskopobjektive können mit einer um den Faktor 1.5 verlängerten Tubuslänge somit auch an einer Vollformatkamera verwendet werden.

Diese nahezu voll auskorrigierten Mikroskopobjektive eignen sich somit auch, wenn sie nicht bei Nennvergrößerung eingesetzt werden.

Wer am Vollformat dennoch die Nennvergrößerung einhalten will, muss je nach Bildqualität in den Ecken das Bild beschneiden.

Deckglas

Zu berücksichtigen bei der Verwendung eines Mikroskopobjektivs ist auch die geforderte Deckglasdicke. Diese findet sich auf dem Mikroskopobjektiv.

Z.B. " NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0".

Die Zahl oder das Zeichen nach dem letzten Schrägstrich "/" bezieht sich auf das Deckglas. Dies kann eine Zahl sein z.B. "/0.17", dann ist eine Deckglasdicke von 0.17mm gefordert, um die höchste Auflösung zu erreichen.

Wird nicht entsprechend vorgegangen, dann kann bei einer Apertur des Objektivs über 0.3 die Auflösung mangelhaft sein.

Bei stark vergrößernden Objektiven und hoher Apertur mit Angabe der Deckglasdicke, muss diese exakt eingehalten werden. Billige Deckgläser variieren in der Dicke und können deshalb am schlecht aufgelösten Bild schuld sein.

- Bis zu einer Apertur von 0.3 ist die Deckglasdicke unkritisch, es kann sogar weggelassen werden, selbst wenn eines gefordert ist.

- Je nach Objektiv wirkt sich bis zu einer Apertur von 0.4 eine Abweichung der Deckglasdicke oder das Weglassen nicht negativ aus.

- Ab einer Apertur von 0.5 muss das Deckglas entsprechend des angegebenen Wertes sein, wenn ein Wert vorhanden ist und dies sehr exakt.

/ 0 bedeutet kein Deckglas, ein Deckglas vermindert die Auflösung

/ - bedeutet, dass das Objektiv Deckglasunempfindlich ist, es kann also ohne oder mit beliebiger Deckglasdicke verwendet werden.

Bei gewölbten Objekten im Auflicht ist ein Objektiv mit der Beschriftung am Ende, mit "/ 0" , "/ -" oder unter "/0.4", vorzuziehen.

Z.B.

NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17

NIKON M Plan 10/0.25, 210/0

NIKON M Plan, 20/0.4 LWD, 210/0

NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0

NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0

NIKON M Plan, 100/0.8 ELWD, 210/0

Die erwähnten Mikroskopobjektive können/müssen somit ohne Deckglas verwendet werden.

Meine Beurteilung der Objektive nach ihrer Auflösung

Wenn von den fotografischen Aufnahmen Bilder ausgedruckt werden, gelten in den Ansprüchen an das Objektiv etwas andere Massstäbe als bei der Betrachtung mit dem Auge am Mikroskop. Während bei der Betrachtung am Mikroskop der Bereich des Interesses zur Betrachtung in die Bildmitte gerückt werden kann, also in den Bereich mit der höchsten Auflösung und wenigsten Farbänder, bedingt durch die chromatische Aberration, sind die Ansprüche eines ausgedruckten Bildes, auch im Randbereich hoch. Fotoobjektive für die "normale" Fotografie sollten in den Ecken höher als 80% der Auflösung in der Bildmitte auflösen. So bewerte ich auch Lupen-, Vergrößerungs- und Mikroskopobjektive für ihre Tauglichkeit in der Fotografie.

Neben den Messungen der Auflösung in der Bildmitte, ermittle ich deshalb auch die Auflösung in den Bildecken. Ist sie in den Bildecken unter 80%, dann sind oft auch Farbänder durch die Chromatische Aberration so stark, dass sie störend wirken. Das Objektiv erachte ich dann als nicht geeignet für die Fotografie. Mikroskopobjektive sind oft in der Bildmitte sehr hochauflösend (hohe Apertur). Üblicherweise geht die hohe Auflösung in der Bildmitte mit einem starken Auflösungsabfall zum Bildrand, den Bildecken einher. Die Auflösung bei Mikroskopobjektiven in den Bildecken sinkt oft stärker ab, als sie sich im Vergleich zu Lupen- und Vergrößerungsobjektiven in der Bildmitte steigert. Da in der Fotografie eine möglichst gleichmässige Auflösung bis in die Ecken erwünscht ist, eignen sich solche, in der Bildmitte speziell hochauflösenden Objektive nicht, denn ihr Auflösungsabfall zu den Bildecken ist sichtbar und wirkt störend. Mikroskopobjektive mit einer etwas geringeren Apertur (geringere Auflösung), sind oft für die Fotografie besser geeignet. Ebenfalls ist ein Plan Objektiv für das Fokus-Stacking nicht nötig. Bei meiner Beurteilung, ob sich ein Objektiv für die Fotografie eignet, berücksichtige ich deshalb zusätzlich auch die durchschnittliche Auflösung. Auflösung in der Bildmitte addiert mit Auflösung in den Bildecken, durch 2.

Beispiel bei 4:1

Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13 (an Vollformat)

Auflösung Bildmitte = 320 LP/mm, Bildecken 320 LP/mm, Ecken 100%,

Durchschnitt = **320** LP/mm

Nikon E Plan 4/0.1 160/- (an Nikon D7100 Crop-Faktor 1.5)

Auflösung Bildmitte = 370 LP/mm, Bildecken 280 LP/mm, Ecken 76% Durchschnitt = **325** LP/mm

Nikon Plan Apo 4/0.20 160/- (an Nikon D7100 Crop-Faktor 1.5) Auflösung Bildmitte = 450 LP/mm, Bildecken 225 LP/mm, Ecken 50% Durchschnitt = **338** LP/mm

Rodenstock APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (in Retro an Vollformat) Auflösung Bildmitte = 360 LP/mm, Bildecken 340 LP/mm, Ecken 94%, Durchschnitt = **350** LP/mm

Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N (in Retro an Vollformat)

Auflösung Bildmitte = 400 LP/mm, Bildecken 350 LP/mm, Ecken 88%,

Durchschnitt = **375** LP/mm

Ist eine möglichst hohe Auflösung in der Bildmitte erwünscht, ist das Nikon Plan Apo 4/0.20 160/- passend.

Ist eine hohe Auflösung in den Bildecken wichtig, dann ist das Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N bei 4:1 vorzuziehen.

Ist eine absolut gleichmässige Auflösung bis in die Bildecken erwünscht, ist das Luminar 40mm, das keinen Auflösungsverlust aufweist, bestens für Fotografie geeignet.

Ist eine hohe Auflösung und ein möglichst gleichmässig aufgelöstes Bild erwünscht, dann ist das Rodenstock APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm vorzuziehen.

Für die Fotografie und grosse Ausdrücke bevorzuge ich deshalb bei 4:1 an einer Vollformatkamera das Rodenstock APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm und das Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N.

Obwohl das Nikon E Plan 4/0.1 160/- in der Bildmitte höher auflöst als das Luminar 40mm und höher als das Rodenstock APO Rodagon, ist es für Fotografie auch an einer Crop-Kamera Faktor 1.5 nicht zu empfehlen, zu hoher Verlust in den Bildecken. Verwendet man eine Kamera mit Crop-Faktor 2, dann ist das Mikroskopobjektiv Nikon E Plan 4/0.1 160/- interessant. Jedoch löst das Vergrößerungsobjektiv Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N auch an einer Kamera mit Crop-Faktor 2 um etwa 10% höher auf und dies bis in die Bildecken!

Das Mikroskopobjektiv Nikon Plan Apo 4/0.20 160/- löst in der Bildmitte bemerkenswert hoch auf, dies ist für die mikroskopische Betrachtung sehr wertvoll. Sein Auflösungsverlust zum Bildrand, ist bei einem üblichen Bildkreis von 20-25mm in der Mikroskopie, mit dem Auge betrachtet, kein Nachteil.

Für die Fotografie, bei einem Bildkreis von 28mm, wie er bei einer Crop-Kamera, Faktor 1.5, erforderlich ist und dem Anspruch, dass die Auflösung in den Ecken nicht geringer als 80% der Auflösung in der Bildmitte betragen soll, ist das Nikon Plan Apo 4/0.20 160/- mit seinem Randverlust der Auflösung von 50%, nach meiner Meinung nicht geeignet! Ein weiterer Nachteil ist sein hoher Preis.

Mikroskopobjektiv Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/-

Urteil der allgemeinen Objektivqualität anhand von Bildern.

Das Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- ist ein Semiplanachromat und wird von vielen Fotografen gelobt. Mindestens einer dieser Fotografen hat erkannt, dass das Objektiv an einer Crop-Kamera in der Bildmitte höher auflöst als manch anderes Objektiv bei 6.3:1. Ich traue diesem Fotografen auch zu, dass seine Beurteilung der Bildqualität in den Bildecken einem geschulten Auge entspricht und deshalb so gut ist, dass es keinen Grund zur Bemängelung gibt.

Aus dieser Überlegung, habe ich das Objektiv besorgt und ausgemessen. Ich wollte wissen, wie hoch die Auflösung in der Bildmitte ist und wie stark sie in den Ecken absinkt, oder absinken darf, damit ein geschultes Auge eines Fotografen die Bildqualität auch in den Ecken noch als gut oder genügend bezeichnet.

An einer Nikon D7100 (Crop-Faktor 1.5) löst das Mikroskopobjektiv Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- in der Bildmitte mit 600 LP/mm auf, dies ist ein sehr guter Wert. Die Chip Diagonale der D7100 beträgt 28.2mm und benötigt somit einen qualitativ guten Bildkreis vom Objektiv mit einem Durchmesser von etwa 28mm. Dies ist beim Semiplan der Fall, denn es löst in den Bildecken mit 550 LP/mm auf, dies ohne sichtbar störende Farbränder, bedingt durch chromatische Aberration (CA). Das sind noch 92% der Auflösung in der Bildmitte. Das Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- ist somit ein Mikroskopobjektiv, das sich hervorragend für die Fotografie mit einer Kamera mit Crop-Faktor 1.5 eignet. Das Objektiv kann mit einer leicht höheren Auflösung auch bei 8:1 eingesetzt werden, es löst dabei in der Bildmitte mit 630 LP/mm und in den Bildecken mit 610LP/mm (97%) auf.

Bei 5:1 beträgt die Auflösung in der Bildmitte 560LP/mm, in den Ecken 450LP/mm, was immer noch 80% der Auflösung in der Bildmitte entspricht.

Das Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- kann somit bei einem Abbildungsmaßstab von 5:1 bis 8:1 an einer Nikon D7100 erfolgreich eingesetzt werden. Dies entspricht einer Bildbreite von 4.7mm bis 3.7mm.

Der freie Arbeitsabstand beträgt 8.5 mm, der Durchmesser des Objektivs 17 mm, der daraus resultierende Abschattungswinkel für die Objektbeleuchtung beträgt etwa 90°. Das Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- an einer Vollformatkamera (Nikon D810) und einem Abbildungsmaßstab von 6.3:1 löst in der Bildmitte mit 560 LP/mm auf, in den Bildecken mit 400LP/mm, dies sind 71% der Auflösung in der Bildmitte.

Verwendet man für eine Bildbreite von 3.7mm bis 4.7mm eine Vollformatkamera (z.B. Nikon D810, Chipbreite 35.9mm) ist dazu ein Abbildungsmaßstab von (35.9mm / 3.7mm) 9.7:1 bis 7.6:1 (35.9mm / 4.7mm) nötig. Dazu eignet sich als Objektiv das Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N. Bei 10:1 besitzt es in der Bildmitte und am Bildrand eine Auflösung von 650LP/mm, bei 7.6:1 beträgt die Auflösung in der Bildmitte und am Bildrand 630LP/mm, dies bei einem freien Arbeitsabstand von 35mm bis 37mm, was bei seinem Durchmesser von 50mm einem Abschattungswinkel von etwa 54° entspricht.

Somit ist die Auflösung bei gleichem Bildausschnitt bei einer Vollformatkamera um etwa 10% höher und die Beleuchtungsmöglichkeit durch den kleineren Abschattungswinkel (54° zu 90°) um einiges besser.

Auch hier zeigt sich, dass bei dieser Bildbreite eine Vollformatkamera mit Vergrößerungsobjektiv eine bessere Abbildung ermöglicht als eine Crop-Kamera (Nikon D7100) mit einem sehr guten Mikroskopobjektiv.

Zur Vollständigkeit dieses Vergleiches muss noch erwähnt werden, dass beim Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- eine Distanz von Objektivanschluss bis Chip ebene von 150mm (160 – 10mm) nötig ist und beim Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N diese 410mm

bis 540mm beträgt, was somit etwa das Dreifache an Distanz ist! Dies kann für manchen Fotografen ein entscheidendes Hindernis für das Nikon EL-NIKKOR 50mm 1:2.8 N an Vollformat sein.

Mit einer Crop-Kamera und dem Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- ist man bestens bedient.

Ein Sonderfall ist die "Fliegenkopf Fotografie". Ein kreisrundes Objekt wird mit einer Kamera mit Seitenverhältnis 2:3 formatfüllend fotografiert. Ein Auflösungsverlust in den Bildecken ist somit nicht nachteilig. Eine Vollformatkamera benötigt (z.B. Nikon D810), wenn die Auflösung bis in die Bildecken optimal sein soll, einen Bildkreis von 43.2mm. Wird nun ein kreisrundes Objekt mit einer Vollformatkamera formatfüllend fotografiert, so muss der Bildkreis mit guter Abbildung nur 24mm (Bildhöhe) betragen. Dies entspricht etwa der Bilddiagonale von 28.2mm einer Crop-Kamera mit Faktor 1.5, vor allem dann, wenn der Fliegenkopf (kreisrundes Objekt) den oberen und unteren Bildrand nicht berührt. Dies bedeutet, dass das Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- beim Fotografieren eines Fliegenkopfes auch an einer Vollformatkamera mit sehr guten Bildergebnissen verwendet werden kann.

Auch hier ist zu beachten, dass mit der Crop-Kamera (Faktor 1.5) und dem Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/- ein Fliegenkopf (rundes Objekt) mit einem Durchmesser von 2.4mm formatfüllend fotografiert werden kann und mit einer Vollformatkamera (Nikon D810) mit einem Carl Zeiss Jena Semiplan 6.3/0.16 160/-formatfüllend ein Fliegenkopf (rundes Objekt) mit einem Durchmesser von 3.8mm. Entsprechend dem Crop-Faktor von 1.5 stehen die Durchmesser der Fliegenköpfe ebenfalls im Verhältnis von 1.5 zueinander.

Wie der Name sagt, ist der **Carl Zeiss Jena Apochromat 6.3/0.20 160/-** bei drei Farbfrequenzen korrigiert. Erwähnt werden muss, dass dies nur in der Bildmitte der Fall ist! An einer Crop-Kamera (Faktor 1.5) sind in den Bildecken sehr viele Farbränder, bedingt durch Chromatische Aberration, zu sehen. Während in der Bildmitte die Auflösung (700LP/mm) bedingt durch die Apertur von 0.2 höher ist als beim Semiplan (600LP/mm), ist sie in den Ecken in einer Suppe von Farbrändern bei etwa 200LP/mm, während das Semiplan 550LP/mm sauber zeichnet.

Das weniger stark vergrößernde **Carl Zeiss Jena Semiplan 3.2/0.10 160/-** löst an der Nikon D7100 (Crop-Faktor 1.5) bei einem Abbildungsmaßstab von 3.2:1 in der Bildmitte mit 340LP/mm sehr hoch auf, jedoch sinkt die Auflösung in den Bildecken sehr stark auf 180LP/mm, das sind nur noch 53% der Auflösung in der Bildmitte, mit nur minimalen Farbrändern (CA). Dies bei einem freien Arbeitsabstand von 20mm und einem Abschattungswinkel von nur 40°.

Das Schneider Componon-S 2.8/50 und das Rodenstock APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (mit oder ohne "N") lösen bei 3.2:1 in der Bildmitte und in den Ecken mit etwa 300LP/mm auf. Dies bei einem freien Arbeitsabstand um die 47mm und einem Abschattungswinkel von ebenfalls nur 40°.

Mitutoyo M Plan Apo Mikroskopobjektive

Mitutoyo Objektive sind Industrielle Inspektionsobjektive. Sie besitzen eine lange parafokale Abgleichlänge von 95mm und unterscheiden sich dadurch von der üblichen Mikroskop-Abgleichlänge für Objektive nach der Norm DIN 58887 mit 45mm, oder Nikon Objektiven mit 65mm.

Bei den Mitutoyo unendlich korrigierten Objektiven, mit "langem freiem Arbeitsabstand", ist betreffend Dimensionen alles etwas grösser, so auch der Bildkreis.

Er besitzt laut Mitutoyo einen Durchmesser von 30mm, also bestens geeignet für Crop Faktor 1.5 mit einer Diagonale von 28mm.

Ist in den Bildecken keine absolut optimale Bildqualität (z.B. Auflösung) gefordert, können diese Mitutoyo Objektive mit der passenden Tubuslinse, z.B. Nikon ITL200 von Thorlabs am Crop Format Faktor 1.5, oder am Vollformat mit der Raynox DCR-150 verwendet werden.

Die Tubuslinse ITL200 löst in der Bildmitte etwas höher auf, jedoch ist ihr qualitativ guter Bildkreis kleiner als bei der Raynox DCR-150.

Die Objektive werden beworben mit:

"Mitutoyo unendlich korrigierte Objektive mit großem Arbeitsabstand".

Bei genauer Betrachtung und dem Verwendungszweck für Auflichtfotografie, trifft dies für das 1X, 2X und das 5X jedoch nicht zu!

MITUTOYO M Plan Apo 1x/0.025

Dieses Mikroskopobjektiv muss man weder besitzen noch ausmessen können um zu erkennen, dass es für Auflichtfotografie mit Focus-Stacking ungeeignet ist!

Beim Mitutoyo M Plan Apo 1x/0.025 beträgt der freie Arbeitsabstand 11 mm, der bei Auflicht abschattende Objektivdurchmesser beträgt 41mm und der lichtabschattende Winkel somit 124°, das ist für Auflicht sehr ungeeignet!

Ein gutes Fotoobjektiv besitzt bei 1:1 einen freien Arbeitsabstand um die 100 mm und einen abschattenden Winkel oft unter 20°.

Bei einem Abbildungsmaßstab von 1:1 beträgt die Tiefe eines gewölbten Objektes, das man mit Focus-Stacking fotografieren möchte, oft mehr als 11 mm. Somit ist ein freier Arbeitsabstand von 11 mm zu gering, um Objekte zu stacken, deren Tiefe über 10 mm beträgt.

Der freie Arbeitsabstand beträgt nur 11 mm, das ist sehr kurz, jedoch nötig, da es zum Mitutoyo Mikroskop passen muss. Die Abgleichlänge (länge Objektiv + freie Arbeitsdistanz) beim Mitutoyo Mikroskop beträgt 95mm.

Da das M Plan Apo 1x Objektiv von seiner Anlagefläche bis Fassungsfront 84 mm misst, bleibt für den freien Arbeitsabstand nur noch (95mm – 84mm) 11mm, was für Auflichtbeleuchtung nicht ideal ist.

Es gibt zahlreiche Fotoobjektive die für einen Abbildungsmaßstab von 1:1 besser geeignet sind.

Das Objektiv eignet sich somit nicht für Fotografie mit Focus-Stacking.

Mitutoyo M Plan Apo 2X/0.055 ∞/0 f=200

Dieses Objektiv ist für 2:1 optimiert. Der abschattende Objektivdurchmesser beträgt 32mm, der freie Arbeitsabstand 34mm, was einen abschattenden Winkel von 50° ergibt.

Ein gutes Fotoobjektiv schattet bei 2:1 mit etwa 40° ab.

In der Bildmitte erreicht es das Maximum an Auflösung (ca. 200LP/mm), was die Nikon D810 Kamera gut auflösen kann und es zeigt zu den Ecken einen Verlust der Auflösung von 35% mit gut sichtbaren Farbrändern, bedingt durch chromatische Aberration (CA).

An einer Kamera mit einem Pixelpitch von 2.2 μm wird das Objekt in der Bildmitte ebenfalls mit 200 LP/mm aufgelöst, somit NICHT höher als mit der Nikon D810 mit einem Pixelpitch von 4.88 μm .

Da das M Plan Apo 2x Objektiv von seiner Anlagefläche bis Fassungsfront 61mm misst, bleibt für den freien Arbeitsabstand nur noch (95mm – 61mm) 34mm, was für Auflichtbeleuchtung nicht ideal ist.

Es gibt zahlreiche Fotoobjektive die für 2:1 besser geeignet sind.

Das Objektiv eignet sich somit nicht für Fotografie mit Focus-Stacking.

MITUTOYO M Plan Apo 5X/0.14 $\infty/0$ f=200

Der abschattende Objektivdurchmesser beträgt 32mm, der freie Arbeitsabstand 25.5mm, der abschattende Winkel beträgt somit 64°.

Ein gutes Lupen- oder Vergrößerungsobjektiv schattet mit etwa 50° ab.

Im Bereich des Abbildungsmaßstabes des MITUTOYO M Plan Apo 5X/0.14 $\infty/0$ f=200, also bei 5:1, gibt es für Fotografie Objektive, deren Abbildungsqualität besser ist.

So löst z.B. das Rodenstock APO Rodagon N 1:2.8, f = 50mm und das Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro bei 5:1 in der Bildmitte etwa gleich hoch und sauber auf, mit einem Verlust an Auflösung zu den Bildecken von etwa 5%, dies ohne sichtbare Farbränder bedingt durch CA.

Beim MITUTOYO M Plan Apo 5X/0.14 $\infty/0$ f=200 an Vollformat sinkt in den Bildecken die Auflösung um etwa 20% und es sind leichte Farbränder bedingt durch CA sichtbar (diese lassen sich durch Bearbeitung entfernen).

Sowohl das Rodenstock APO Rodagon N 1:2.8, f = 50mm wie auch das Laowa 25mm F 2.8, 2.5-5X Ultra Macro sind ebenfalls im Abbildungsmaßstab um einiges flexibler als das MITUTOYO M Plan Apo 5X/0.14 $\infty/0$ f=200.

Es gibt zahlreiche Foto-, Lupen- und Vergrößerungsobjektive die für 5:1 besser geeignet sind.

Das Objektiv eignet sich somit nicht speziell für Fotografie mit Focus-Stacking.

Der oft erwähnte sehr lange Arbeitsabstand der Mitutoyo Objektive, trifft nicht auf die 1x, 2x und 5x M Plan Objektive zu, wenn sie für Fotografie mit Focus-Stacking verwendet werden!

Beim Erwähnten zeigt sich klar (von 1:1 bis 5:1), dass Mikroskopobjektive, auch wenn es Mitutoyo M Plan Apo sind, viel teurer als ein gutes Fotoobjektiv sind und sich nicht speziell für Fotografie eignen (musste wieder mal gesagt sein).

MITUTOYO M Plan Apo 10X/0.28 $\infty/0$ f=200 und

MITUTOYO M Plan Apo 20X/0.42 $\infty/0$ f=200

Das 20X Objektiv schattet mit einem Winkel von 50° und das 10X mit 62° ab.

Zum Vergleich, das Reichert Austria 10/0.25 160/- mit 65°

und das Nikon M Plan 20/0.4 ELWD 210/- mit 66°.

Hier ist bei den Mitutoyo Objektiven der freie Arbeitsabstand erwähnenswert lang.

Bei gleichem objektseitigem Bildausschnitt muss am Vollformat stärker vergrößert werden als am Crop Format, was automatisch eine höhere optische Auflösung ergibt.

Am Vollformat sinkt in den Ecken die Auflösung beim

MITUTOYO M Plan Apo 10X/0.28 $\infty/0$ f=200 und dem

MITUTOYO M Plan Apo 20X/0.42 $\infty/0$ f=200

lediglich um etwa 10% ab und dies bei einer Bildqualität, die sich von der Qualität in der Bildmitte nicht störend sichtbar unterscheidet, also geeignet für Vollformat.

Für 10:1 und 20:1 kenne ich keine Foto-, Lupen- oder Vergrößerungsobjektive, die mithalten können.

Ersichtlich ist, dass von der guten Qualität und Eignung für Focus-Stacking der beiden MITUTOYO M Plan Apo 10X/0.28 $\infty/0$ f=200 und MITUTOYO M Plan Apo 20X/0.42 $\infty/0$ f=200 nicht gefolgert werden kann, dass alle Objektive der Serie MITUTOYO M Plan Apo für Fotografie mit Focus-Stacking geeignet sind.

Folgende Mitutoyo M Plan Apo Objektive kenne ich aus eigener Erfahrung nicht:

MITUTOYO M Plan Apo 7.5X/0.21 $\infty/0$ f=200

MITUTOYO M Plan Apo 50X/0.55 $\infty/0$ f=200

MITUTOYO M Plan Apo 100X/0.7 $\infty/0$ f=200

Auflösungssteigerung durch Panorama Fotografie

Für eine hohe Auflösung ist auch eine Kamera mit kleinen Pixeln nötig. Der Abstand zwischen den Pixeln, auch Pixelpitch genannt, ist dann sehr klein, so auch deren Fläche. Nur mit einem kleinen Pixelpitch kann die hohe Auflösung des Objektivs abgebildet werden.

Dazu verwende ich die Nikon D7100 (Crop-Faktor 1.5) mit 6000x4000 Pixeln auf einem Chip, in der Grösse von 23.5x15.6mm.

Der Pixelpitch beträgt, $23.5\text{mm} / 6000 = 0.0039\text{mm}$, somit ein Pixelpitch von $3.9\mu\text{m}$.

Oder die Nikon D810 (Vollformat) mit 7360x4912 Pixeln auf einem Chip von 35.9x24.0mm.

Der Pixelpitch beträgt $35.9\text{mm} / 7360 = 0.0049\text{mm}$, somit ein Pixelpitch von $4.9\mu\text{m}$.

Im Bereich von etwa 5:1 bis 100:1 lösen diese Kameras gleichhoch oder höher als die Objektive auf. Es macht somit keinen Sinn, die Vergrößerung durch einen längeren Auszug (längere Tubuslänge) mit Zwischenringen oder Balgen zu steigern, da sich die Auflösung nur minimal und nicht sichtbar erhöht, jedoch der Bildausschnitt kleiner wird und somit die gesamte Bildinformation sinkt! Zur Steigerung der Auflösung sind Objektive nötig, die von Grund auf stärker vergrössern.

Einige Vergleichszahlen der Auflösung an einer Nikon 7100 (Crop Faktor 1.5).

1:1, AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D, 125LP/mm, (das Objektiv löst höher auf als der Chip)

2:1, AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D, 240LP/mm, (das Objektiv löst höher auf als der Chip)

3:1, AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D, 280LP/mm, (das Objektiv löst höher auf als der Chip)

4:1, AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D, 320LP/mm, (das Objektiv löst gleichhoch auf wie der Chip)

4:1, Luminar 63mm, Version 3, 1:4.5/A0.11, 340LP/mm, (das Objektiv löst gleichhoch auf wie der Chip)

4:1, Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13, 360LP/mm, (das Objektiv löst gleichhoch auf wie der Chip)

5:1, Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13, 380LP/mm, (das Objektiv löst gleichhoch auf wie der Chip)

5:1, Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15, 430LP/mm, (das Objektiv löst gleichhoch auf wie der Chip)

6:1, Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15, 450LP/mm

7:1, Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15, 460LP/mm

8:1, Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15, 470LP/mm

8:1, Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2, 640LP/mm

9:1, Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15, 475LP/mm

9:1, Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2, 665LP/mm

10:1, Luminar 25mm, Version 3, 1:3.5/A0.15, 480LP/mm

10:1, Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2, 680LP/mm

10:1, NIKON CFN, PLAN 10/0.30, 160/0.17, 1000LP/mm

12:1, Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2, 680LP/mm, (ab 10:1 keine Steigerung der Auflösung)

14:1, Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2, 680LP/mm, (ab 10:1 keine Steigerung der Auflösung)

16:1, Luminar 16mm, Version 3, 1:2.5/A0.2, 680LP/mm, (ab 10:1 keine Steigerung der Auflösung)

20:1, NIKON M Plan 20/0.4 LWD, 210/0, 1250LP/mm

40:1, NIKON M Plan, 40/0.5 ELWD, 210/0, 1800LP/mm

60:1, NIKON M Plan, 60/0.7 ELWD, 210/0, 2400LP/mm

100:1, NIKON M Plan, 100/0.8 ELWD, 210/0, 2800LP/mm

Es wird ersichtlich, dass durch ein stärker vergrösserndes Objektiv eine höhere Auflösung erreicht wird und somit kleinere Details sichtbar werden, jedoch verkleinert sich der Bildausschnitt. Fertigt man nun mehrere Stacks mit Überlappung an, können die einzelnen Stacks mit einer Panorama-Software zu einem höher aufgelösten Bild zusammengefügt werden (z.B. mit der Panorama-Software ICE von Microsoft).

Der Nodal- oder Knotenpunkt muss nicht berücksichtigt werden, da die Aufnahmen nicht von einem Punkt aus, durch Schwenken der Kamera angefertigt werden, sondern durch Verschiebung der Kamera oder besser, des Objektes. Also ähnlich wie in der Kartografie,

wenn die Landschaft aus einem Flugzeug, immer im gleichen Winkel, während des Fluges (unterschiedlicher Standort) fotografiert wird. Die Anforderung an die Panorama Software, betreffend des Bildverzuges sind somit gering. Die frei erhältliche Panorama Software ICE (Image Composite Editor) von Microsoft ist dazu bestens geeignet, sie kommt auch mit extrem grossen Bildern (1GB) zurecht.

Beispiel 1:

Die Panoramafotografie erhöht die Auflösung und der Bildausschnitt lässt sich unabhängig vom Chipformat der Kamera optimal wählen.

Möchte man das Innere einer Aronstabblüte in einem Stack ablichten, so ist bedingt durch die Grösse des Objektes (12cm x 3cm) ein Abbildungsmassstab bei einer Vollformatkamera (36 x 24) im Hochformat von 1:3 nötig.

Mit einer Nikon D810 mit einer Bildbreite von 7360Pixeln (3680 LP/BB) entspricht dies bei 1:3 einer Auflösung der Realität von (3680 LP / 120mm) 30.6 LP/mm.

In der Bildbreite nimmt das Objekt nur etwa 40% des Bildformates ein, somit ist das Bildformat der Kamera nicht optimal ausgenützt.

Fotografiert man das Objekt mit mehreren Stacks und setzt die Bilder mit einer Panorama-Software zusammen, erhöht sich die Auflösung.

Im Folgenden habe ich bei einem Abbildungsmassstab von 1.2:1 im Querformat fotografiert. Die erfasste Bildbreite in Realität beträgt (36mm / 1.2) 30mm, die Höhe (24mm / 1.2) 20mm.

Da das Objekt 120mm hoch ist und mit einer Überlappung fotografiert werden muss, waren in der Höhe übereinander 8 Stacks nötig.

Die Auflösung (hier zeichnet das Objektiv immer noch mit maximaler Auflösung) des 20mm hohen Ausschnittes (Nikon D810, Bildhöhe 4912 Pixel = 2456 LP/BH) beträgt, (2456 LP / 20mm) 122.8 LP/mm.

Sie ist somit 4x höher, als wenn in einem Stack das Objekt aufgenommen wird.

Das resultierende Panoramabild besitzt eine Grösse von 29472 x 7360 = 217MPixel.

Strebt man einen Ausdruck von 300dpi an, das sind etwa 118 Bildpunkte/cm, dann kann der Ausdruck (29472 / 118) etwa 2Meter hoch und 50cm breit sein.

Da ich das Bild etwas beschneiden musste, hat das resultierende Bild eine Höhe von 2 Meter und eine Breite von 56cm.

Folgende Seite:

Beispiel 1: Das Bild auf der linken Seite zeigt den Aronstab mit 300dpi.

Beispiel 2: Auf der rechten Seite sieht man einen Ausschnitt des Panzers eines tropischen Rosenkäfers (*Eudicella gralli hubini*), der auf die gleiche Art gefertigt wurde, ebenfalls in der hohen Auflösung von 300dpi.



Beispiel 2:

Bild des Rosenkäfers.

Aus meinen bisherigen Stacks habe ich den Panzer des Rosenkäfers (*Eudicella gralli hubini*) ausgesucht. Es ist ein eher einfaches Objekt, das keiner grossen Vorbereitung bedarf. Ich zeige ein Band vom Halsschild (Pronotum), Schildchen (Scutellum), den Flügeldecken (Elytre) bis zum Analtergit (Pygidium). Die Bildhöhe in Realität beträgt 25mm und entspricht bei einem Abbildungsmassstab von 1:1 in etwa der Bildbreite einer Crop-Kamera.

Verwendet man dazu ein übliches 105mm Foto Makroobjektiv erhält man eine Auflösung von 125LP/mm, der Panzer wird somit auf die Bildbreite (24mm) mit $(125\text{LP/mm} \times 24\text{mm})$ 3000 Linienpaaren aufgelöst. Dazu ist eine Kamera mit mindestens 6000 Pixel in der Bildbreite nötig.

Die Nikon D7100 mit 6000x4000 (24MP) ist dazu bestens geeignet. Will man diesen Bildausschnitt in besserer Qualität, also höherer Auflösung abbilden, findet man auch unter den Mittelformatkameras keine bessere Lösung. Ein machbarer Weg ist die Panoramafotografie, die aus mehreren Bildern zusammengesetzt ist. Ich verwende dazu die Vollformatkamera Nikon D810, trotz der etwas grösseren Pixel löst sie minimal höher auf als die etwas ältere Crop-Kamera Nikon D7100. So ist ebenfalls der optische Eindruck in den Ecken, mit dem Auge begutachtet, bei der Vollformat-(D810) besser als bei der

Crop-Kamera (D7100), vorausgesetzt dass die Optik für einen grossen Bildkreis berechnet ist (also für Mikroskopobjektive nichtzutreffend). Die Luminare besitzen einen grossen Bildkreis, der auch für Mittelformat geeignet ist (6x6cm = Diagonale von 8.5cm).

Das Käferpanzerteil wird in fünf Ausschnitten gestackt, beginnend beim Halsschild im Querformat und die weiteren Ausschnitte folgen mit genügend Überlappung darunter, bis zum Körperende. Als Objektiv verwende ich das ZEISS Luminar 40mm bei einem Abbildungsmaassstab von 4:1, seine Auflösung beträgt 360LP/mm. Das resultierende Panoramabild ist 7'024x22'007 Pixel und somit 154 MPixel gross. Nach dem Zuschneiden erhalte ich eine Grösse von 5'207x18'608 Pixel, ca.97 MPixel.

Um einen Ausdruck auf 2 Meter mit 300dpi zu erreichen, wird das Bild mit Photoshop auf 5374x21408 Pixel minim vergrössert, die Filmgrösse beträgt dann 200cm x 56cm.

Betrachtet man das Bild aus einem üblichen Abstand, bei dem man einen Überblick über das ganze Bild hat, dann beträgt der Betrachtungsabstand etwa 3 Meter. Das Bild besitzt jedoch nicht die entsprechend nötige und übliche Auflösung von 72dpi, sondern 300dpi. Ein kürzerer Betrachtungsabstand zeigt somit weitere Details, so dass bei etwa 70cm Betrachtungsabstand (und bestens angepasster Brille) das Maximum an Details und somit Auflösung sichtbar wird.

Dies trifft dann auch den Sinn und Zweck des Aufwandes. Es soll so sein, wie wir es bei der natürlichen Betrachtung realer Objekte gewohnt sind, beim Nähertreten werden mehr Details sichtbar.

Auflösungssteigerung der Bilder

Bei der Panoramafotografie geht es beim Zusammenfügen von Einzelbildern nicht nur darum, einen grösseren Bereich (Winkel) der Realität in einem Bild so festzuhalten, wie wenn man ein extremes Weitwinkelobjektiv verwendet hätte, sondern die Auflösung ist bedeutend höher.

Schenkt man der Steigerung der Auflösung in der Makro- und Mikrofotografie die Aufmerksamkeit, dann erkennt man, dass dies mit der Panoramafotografie zu extrem hoch aufgelösten Bildern führen kann.

Beispiele:

Ein Bildausschnitt, der in Realität 6 mm breit und 4 mm hoch ist, muss mit einer Nikon D7100 (23.5 x 15.6 mm / 6000 x 4000 Pixel = 24 MPixel) etwa 4 mal vergrössert werden, um einen formatfüllendes Bild zu erhalten. Die Auflösung des passenden Zeiss Luminars beträgt dabei 330 LP/mm, es werden somit in der Bildbreite etwa 2000 LP abgebildet (6mm x 330 LP/mm ergibt etwa 2000 LP/BB).

Bildet man die 6mm Realität mit 2 Bildern ab, die mit Panoramasoftware an der längeren Seite zusammengefügt werden, dann können zwei stärker vergrösserte Bilder in Hochformat, mit 10% Überlappung an der langen Seite angefertigt werden. Man erhält dadurch ein Panoramabild mit einer Höhe von 6000 x 7600 Pixeln (= 45 MPixel). Die Chipbreite wird zur Bildhöhe von 6000 Pixeln (23.5 mm) und die Chiphöhe wird durch die Überlappung von 10% zu einer Bildbreite von ((4000-10%) + 4000 Pixel = 7600 Pixel / Chiphöhe 15.6 mm -10% = 14mm, 14 mm + 15.6 mm = 29.6 mm) 7600Pixel bei 29.6 mm (zusammengesetzter Chipbreite). Bei 4000 x 6000 Pixeln beträgt das Seitenverhältnis 1.5, bei 7600 x 6000 beträgt es 1.26.

Möchte man nun die 6 mm Bildbreite der Realität auf 29.6 mm der zusammengesetzten Chipbreite vergrössern, muss die Realität (29.6 mm / 6 mm = 4.93) etwa 5 mal vergrössert werden. Dazu eignet sich das Zeiss Luminar 25mm, es löst die Realität mit 450 LP/mm auf, auf die Bildbreite ergibt sich dadurch (6 mm x 450 LP/mm) eine Auflösung von 2700 LP/BB.

Das Panoramabild mit 2700 LP/BB besitzt gegenüber einem einfachen Bild mit 2000 LP/BB eine um 35% gesteigerte Auflösung.

Wird der Bildausschnitt der Realität von 6 mm Breite mit 2x2, also 4 Bildern mit Panorama fotografiert, kann mit einer Steigerung der Auflösung von etwa 60% gerechnet werden.

WICHTIG:

Fotografiert man einen bestimmten Objektausschnitt mit mehreren Bildern (Panorama), muss, um eine höhere Auflösung zu erhalten, der Abbildungsmassstab vergrössert werden. Eine Erhöhung der Auflösung tritt aber nur ein, wenn ein stärker vergrösserndes und somit höher auflösendes Objektiv verwendet wird!

Wird der grössere Abbildungsmassstab bei gleichem Objektiv mit mehr Auszug (Distanz zwischen Objektiv und Chip), also längeren Zwischenringen oder Balgen erreicht, dann tritt bei einer hochauflösenden Kamera, keine nennenswerte (sichtbare) Erhöhung der Auflösung ein (nur etwa 5%)!

Wird eine schwach auflösende Kamera verwendet (Kamera löst geringer als das Objektiv auf), kann eine Erhöhung der Auflösung im Bild stattfinden.

Reduzierung der Anzahl Stackschritte

Werden ganze Tiere (z.B.) Insekten gestackt, kann es möglich sein, dass die Tiefe die gestackt werden muss und somit die Anzahl Einzelbilder, sehr gross wird. Nach dem Stacken mit der Stackingsoftware beinhalten die Bilder viele Artefakte, die mit Retusche nicht behoben werden können.

Hier empfiehlt sich im Gegensatz zur Auflösungssteigerung eine Auflösungsreduzierung, indem nicht so stark vergrössert oder abgeblendet wird und somit die Schärfentiefe der Einzelbilder höher wird.

Wenn weniger vergrössert wird, steigt die freie Arbeitsdistanz, es kann somit besser beleuchtet werden (dies kann die Details besser sichtbar machen), die Schärfentiefe ist höher und die Anzahl der Stackschritte somit geringer. Es entstehen somit beim Stacken eher Bilder, die weniger Artefakte enthalten. Jedoch ist die Auflösung geringer. Wird die Blende um einige Stufen geschlossen, erhöht sich wohl die Schärfentiefe, doch der freie Arbeitsabstand wird nicht grösser und die Auflösung reduziert sich ebenfalls.

Schärfentiefe, Verlauf im Bild

In der vergrößernden Fotografie mit der "kritischen Blende" (höchst auflösende Blende), ist die Schärfentiefe sehr gering.

Wird ein Objekt vor einem in die Tiefe verlaufenden Hintergrund gestackt, also nur das Objekt gestackt, dann ist der Verlauf in die Unschärfe, entsprechend dem Abbildungsmaßstab und der kritischen Blende, sehr abrupt. Dies kann in einem Bild störend wirken.



Zu sehen ist eine Galle der Gestreiften Eichengallwespe (*Cynips longiventris*) auf der Unterseite eines Eichenblattes.

Unbearbeitetes Bild:

Nikon D810, Rodenstock APO Rodagon N 1:4, $f = 80\text{mm}$ (in Retro), Blende 4.8,

Abbildungsmaßstab 3:1, Stackschrittgröße 0.03mm

Stack bestehend aus 137 Einzelbildern, Tiefe = 4.11mm.

Wird auch der Hintergrund bis zum oberen Bildrand gestackt, das entspricht einer Tiefe von 15.15mm, sind dazu 505 Einzelbilder nötig, also etwa 3.7 Mal mehr Einzelbilder.

Das "durchgestackte" Bild sieht dann folgendermassen aus.



Hier wirkt die durchgehende Schärfe, bis zum Eichenblatt im Hintergrund, ebenfalls etwas ungewohnt, doch bei diesem Bild kann mit Bildbearbeitung ein Verlauf der Schärfe in die Unschärfe eingefügt werden, was dann im Bild natürlicher wirkt.





Das Objektiv macht das Bild!

Test: Equipment Teile selber testen.

Im Bereich der Makro- und Mikrofotografie verwendet man unterschiedliche mechanische, elektrische, elektronische und optische Bauteile, die am Gelingen eines Focus-Stacks beteiligt sind.

Auf Empfehlung oder anhand von Testergebnissen werden diese angeschafft. Oft ist es aber so, dass beim eigenen Gebrauch andere Bedingungen bestehen, als sie bei bekannten Fotografen oder unter Laborbedingungen vorhanden sind.

Abbildungsmaßstab, Fotoapparat, Objektiv, Licht usw. entsprechen selten der eigenen Ausrüstung.

Stellt man mit unterschiedlichem Setup Bilder vom gleichen Objekt an, dann kann es sein, dass in den resultierenden Bildern wohl Unterschiede sichtbar sind, man aber nicht weiss, wie sie gedeutet werden müssen. Oft ist auch nicht klar erkennbar, was nun besser ist.

Bei Vergleichen ist zu beachten, dass nur ein Faktor geändert wird, damit man weiss, wer Schuld am Unterschied hat. Dennoch kann eine Unsicherheit bestehen bleiben.

Um Klarheit zu schaffen kann man, unter vergleichbaren Bedingungen und Änderung von nur einem Faktor, Vergleichsaufnahmen herstellen. Diese Ergebnisse lassen sich nur bedingt mit Labortests oder Erfahrungen, die anderen Fotografen gemacht haben vergleichen, doch treffen sie für den eigenen Gebrauch massgebend zu.

Um verlässliche Messungen und Vergleiche anstellen zu können, sollte man mit der Technik des Messens vertraut sein. Also beruflich eine Messtechnik gelernt haben. Man erkennt dann eher eine Problematik und kennt einigermaßen den Umgang, um Fehlmessungen zu vermeiden und neigt auch nicht dazu, nur anhand einer Messung ein Teil als tauglich oder untauglich zu bewerten.

Die Taktik bei eigenen Messungen und Vergleichen, sollte einige Faktoren berücksichtigen:

Allgemein sollen Messungen wiederholt werden und nicht die besten Ergebnisse als verbindlich betrachtet werden, sondern eher ein Durchschnittswert.

Ausserordentlich gute Messergebnisse sollte man zu einem späteren Zeitpunkt, bei erneutem Aufbau der Testanordnung wiederholt messen!

Bei einer Messreihe z.B. unterschiedliche Blende, sollten Ausreisser, also stark abweichende Messergebnisse, zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden.

Bei Vergleichen sollen aktuell die am Vergleich beteiligten Faktoren neu gemessen werden. Es sollten keine alten Messresultate mit aktuellen verglichen werden.

Die Folgenden Testverfahren sind Anregungen und Hinweise, wie man es machen könnte. Auch wenn man etwas falsch macht, so setzt man sich doch mit der Materie auseinander und wird mit der Zeit weniger Fehlmessungen anfertigen.

Durch das Messen lernt man die beteiligten Faktoren besser kennen und der Umgang mit den Geräten und Materialien erhöht die Kenntnis derer.

Ebenfalls ist die Auseinandersetzung ein guter Zeitvertreib, wenn es am passenden Wetter oder Objekt fehlt.

Test: Vorwort zum Test von Objektiven

Hier ist die Rede von Objektiven, die sich in der Fotografie mit DSLR Kameras, für Focus-Stacking bei einem Abbildungsmaßstab von 1:1 bis 100:1 eignen. Bei Fotoobjektiven im Bereich der Makrofotografie besteht ein Angebot von Objektiven, die schon mehrfach geprüft wurden und Testdaten zur Verfügung stehen. Diese Daten beziehen sich aber meistens auf einen verkleinernden Abbildungsmaßstab bis maximal 1:1.

Es sind auch Daten von Vergrößerungs- und Lupenobjektiven für die Fotografie bekannt. Inwieweit sich Mikroskopobjektive für die Fotografie mit DSLR Kameras eignen, ist nur wenig mit Messdaten dokumentiert.

Als Fotograf im Bereich Makro- und Mikrofotografie ist es somit nicht einfach, im Bereich 1:1 und einem vergrößernden Abbildungsmaßstab, ein gutes und passendes Objektiv zu finden.

Wichtig ist ebenfalls, sich nicht alleine auf Empfehlungen von "Hobby"-Fotografen zu verlassen, denn diese besitzen nicht unbedingt das gleiche Setup und ein genügend kritisches Urteilsvermögen, oder reden lediglich etwas in etwa nach, das sie irgendwo, irgendwann einmal gelesen oder gehört haben.

Bei eigenen Tests lernt man die Problematik der Testverfahren kennen und verbessern, was ebenfalls eine angenehme Beschäftigung sein kann und das Verständnis der Zusammenhänge fördert.

Allgemein soll gelten, dass man sich danach richtet, was man selber festgestellt hat. Hat man sich getäuscht und Fehlmessungen gemacht, dann merkt man das nach einiger Zeit, lernt daraus und entwickelt sich weiter. So wird man von allgemeinen, unzuverlässigen Empfehlungen (z.B. im Internet) unabhängiger.

Hier möchte ich beschreiben, was nach meiner Meinung die wichtigen Faktoren sind und wie man mit eigenen Mitteln Objektiv für ihre Eignung testen kann.

Es sei erwähnt, dass eigene Erfahrung mit Messtechnik und das beruflich gelernte Messen von grossem Vorteil ist. Fehlmessungen können eher vermieden werden, man weiss, was man misst und die Deutung der Messergebnisse ist realitätsnäher.

Da man bei einem sehr guten Makroobjektiv, das als Referenz-Objektiv im Makrobereich gilt, geneigt ist anzunehmen, dass es sicherlich auch bei einem Abbildungsmaßstab von 2:1 oder 3:1 in einem Test hervorragend abschliesst, beginne ich mit dem ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2.

Siehe:

Test: ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2

Wie schon erwähnt, ist es wichtig, solche Tests selber zu machen!

Unter den Abbildungsfehlern (Aberrationen) sind die folgenden, in der Makro- und Mikrofotografie von natürlichen Objekten (Pflanzen und Tiere) störend und auffällig.

Test: Abbildungsfehler, CA (Chromatische Aberration)

Diese beinhaltet Farblängs- und Farbquerfehler, sowie die chromatische Vergrößerungsdifferenz. Sie können nicht einfach quantitativ gemessen werden, also mit einer Zahl dokumentiert werden, sondern sie werden immer auf die gleiche Art fotografiert und bei unterschiedlichen Objektiven verglichen, also qualitativ. Sichtbar sind diese Abbildungsfehler in Form von Farbrändern an Kanten und sind vom Auge gut erkennbar und störend. Bei abgebildeten schwarzen Streifen besitzen diese in Richtung Bildmitte einen meist rotgelben Farbsaum und zum Bildrand einen blauen Farbsaum. In den Bildecken sind die Farbränder durch die CA am stärksten und müssen deshalb in den Ecken beurteilt werden.

Um diese CA gut zu sehen und beurteilen zu können, verwendet man ein Mikroskopisches Trägerglas mit Strichgitter.

z.B. in der Art eines Objektfinder. Siehe dazu auch:

CellFinder, S7 England Finder

z.B.

<https://www.graticulesoptics.com/products/stage-micrometers-calibration-scales-grids/coordinate-graticules/s7-england-finder>

Ich verwende von Carl Zeiss einen Objektträger mit einem Gitternetz das 24300 Rechtecke von 0.25x0.25mm besitzt. Dieses kann für Testbilder mit einer DSLR-Kamera Crop-Faktor 1.5 mit einem Objektiv bis 100-facher Vergrößerung gut verwendet werden, um Farbränder bedingt durch CA zu sehen.

Ebenfalls eignet sich dieses Testobjekt auch, um kissenförmige oder tonnenförmige Verzeichnungen festzustellen. Diese sind aber meist so klein, dass sie bei der Fotografie von Pflanzen und Tieren nicht störend wirken.



Mikroskopobjektiv: Carl Zeiss Jena 10/0.25 160/-

Bildausschnitt, linke obere Ecke.

Ein Drehen des Target, zeigt dass beim Strich zur Bildmitte die CA nicht so deutlich erkennbar ist. Die Beurteilung bei Vergleichen muss immer im gleichen Winkel, vorzugsweise waagrecht/senkrecht erfolgen und ist qualitativ.

Test: Auflösung bei Objektiven

LP/mm = Linienpaare pro Millimeter, bezieht sich in diesem Dokument NICHT auf die Auflösung auf dem Chip, sondern auf die Anzahl aufgelöster Linienpaare pro Millimeter des Objektes, welche im Bild noch sichtbar ist.

LP/BB = Linienpaare pro Bildbreite. Die Bildbreite ist die Bildbreite des Bildausschnittes in Realität und auf dem Fotochip. Hier ist zu berücksichtigen, dass bei gleicher Vergrößerung die Bildbreite des abgebildeten Bildausschnittes der Realität, bei Vollformat, Crop-Faktor 1.5 und Crop-2 Kameras unterschiedlich sind und somit bei gleicher Auflösung (LP/mm) auch die Linienpaare (LP/BB) entsprechend unterschiedlich! Die Grenze der Auflösung ist messtechnisch so definiert, dass sie erreicht ist, wenn der Kontrast (Helligkeitsunterschied) zwischen den schwarzen Streifen und den weissen Zwischenräumen auf 10% sinkt.

Muss diese Auflösungsgrenze vom Auge beurteilt werden, dann hat sich bewährt, dass man bei den unterschiedlich eng angeordneten Paketen der Striche, das Paket, bei welchem die Striche noch erkennbar sind, als aufgelöst und somit als obere Auflösungsgrenze betrachtet. Ist man etwas geübt, lassen sich auch Zwischenwerte schätzen.

Natürlich kann der Kontrast (Helligkeitsunterschied) auch mit Software. z.B. Fitswork bestimmt werden.

In Fitswork:

Bearbeiten, weitere Funktionen, Pixellinie als Diagramm anzeigen

Rechte Maustaste auf Bild zeigt weitere Optionen.

Wichtig bei der Beurteilung ist zusätzlich die Begutachtung der allgemeinen Bildqualität.

Farbsäume durch CA oder unterschiedliche Auflösung bei Strichen die zur Bildmitte zeigen (sagittal), oder quer zu ihr stehen (tangential).

Das Zeiss Auflösungsstest - Objekt 3000 besitzt wie viele andere Test-Targets waagrechte und senkrechte Linien mit unterschiedlichen Breiten, Abständen und Grössen.

Richtet man diese exakt waagrecht und senkrecht entsprechend dem Bildrand aus, dann erhält man bei der digitalen Fotografie, die auch die Sensorpixel waagrecht und senkrecht ausgerichtet hat, im Gegensatz zur analogen Fotografie nur unklare Werte! Bei digitalen Kameras müssen die Linien des Test-Targets weder senkrecht, waagrecht, noch in einem 45° Winkel ausgerichtet werden, sondern in einem Bereich von etwa 20° bis 40°, denn in diesem Bereich sind Auflösungsunterschiede klarer erkennbar.

Ob nun in Auflicht oder Durchlicht gemessen wird, ist nicht ausschlaggebend, wichtig ist lediglich, dass zu Vergleichszwecken immer mit der gleichen Beleuchtung gemessen wird. Damit das einfallende Licht keine störenden Reflexe bewirkt, ist ein Diffusor oder indirektes Licht anzuwenden.

Messungen sind in der Bildmitte und vor allem in den Ecken zu tätigen. Im Bereich der Lupen- und Vergrößerungsobjektive, also bei 1:1 bis 10:1 sollte die Auflösung in den Ecken mehr als 80% der Auflösung in der Bildmitte betragen. Sinkt bei Mikroskopobjektiven ab einem Abbildungsstabsstab von 10:1 und stärkerer Vergrößerung, die Auflösung in den Ecken unter 80% vom Wert in der Bildmitte, ist das Objektiv in der gemessenen Vergrößerung für Fotografie nicht speziell geeignet, denn im resultierenden Bild ist dies für flächenabbildende Bilder als Mangel zu erkennen. Eine Ausnahme besteht, wenn das Objekt kreisrund ist und sich in den Ecken keine wichtige Bildinformation befindet.

Dies zeigt, dass das Objekt mit seiner Form entscheidend sein kann, welches Objektiv Verwendung findet.

Ebenfalls müssen die Messungen bei Foto-, Vergrößerungs- und Lupenobjektiven bei jedem Abbildungsmaßstab und mit unterschiedlicher Blende angefertigt werden.

Für Focus-Stacking kommt immer die "Kritische Blende", die am höchsten auflöst, zur Anwendung!

Verfügt man über kein geeignetes Target (Auflösungstest), dann kann man für Vergleiche auch farbige Bildvorlagen verwenden. Speziell geeignet sind Banknoten, oft besitzen sie sehr klein gedruckten Text (0.25mm). Man entscheidet sich für einen ganz bestimmten Ausschnitt mit möglichst vielen kleinen Details, den man sich gut merken und gut finden kann. Diesen stackt man in der Bildmitte, danach schiebt man ihn in die Bildecken, wo er ebenfalls gestackt wird. So sind Vergleiche bei gleichem Licht und Setup möglich, es können so auch unterschiedliche Objektive bei gleichem Setup verglichen werden. Für spätere Vergleiche sollte die gleiche Banknote Verwendung finden. Also immer schön einen 100er bei Seite behalten :)

Bei diesen Vergleichen kennt man die Werte der Auflösung nicht, jedoch ist es einfach festzustellen, welches Objektiv besser auflöst.

Auch hier gilt, immer auch die Bildqualität in den Bildecken zu vergleichen.

Nicht störende Abbildungsfehler (Aberrationen):

- Verzeichnung, Tonnen- oder Kissenförmig
- Plan, der optimale Fokus ist gleichzeitig in der Bildmitte, wie auch am Bildrand
- Flauer Kontrast, dieser kann mit Bildbearbeitung wenn nötig erhöht werden
- Vergütung der Linsen, nicht zwingend nötig, siehe Kontrast

Test: Messen der Brennweite eines Objektivs

Oft wird erwähnt, dass sich die Brennweite eines Makroobjektivs mit steigendem Abbildungsmaßstab verkürzt, jedoch ist unbekannt, ob und um wie viel sich die Brennweite verändert.

Bei Objektiven mit Innenfokussierung (Floating Elements) wird die Brennweite kürzer wenn auf kurze Distanz fokussiert wird.

Fotografen die mit Objektivköpfen arbeiten, also Lupen- und Vergrößerungsobjektiven, kennen den Zusammenhang zwischen Abbildungsmaßstab, Brennweite und Auszug. Sie sollten es wissen!

Bei 1:1 kann die Distanz zwischen Gegenstandsebene und Bildebene (Sensor) gemessen werden, teilt man diese durch 4, resultiert die Brennweite des verwendeten Objektivs. Dies stimmt exakt bei Objektiven, die keine verkürzte Bauweise besitzen, (Teleobjektive besitzen eine verkürzte Bauweise).

Ein 55mm Objektiv auf unendlich fokussiert am Balgen, zeigt einen Abbildungsmaßstab von 1:1, wenn die Distanz von Gegenstandsebene bis Bildebene 220mm (es ist die kürzeste mögliche Distanz mit einer scharfen Abbildung), beträgt, da $220\text{mm} / 4 = 55\text{mm}$.

Erhöht man beim 55mm Objektiv den Auszug um 55mm erreicht man einen Abbildungsmaßstab von 2:1, eine weitere Verlängerung des Auszuges um 55mm erhöht den Abbildungsmaßstab auf 3:1. Die jeweilige Verlängerung des Auszuges, bei Erhöhung des Abbildungsmaßstabes um den Wert 1, entspricht exakt der Brennweite des Objektivs. So kann auch geprüft werden, wie gross die Brennweite eines Fotoobjektivs ist, wenn es auf nah fokussiert ist. Sie kann sich von 55mm auf 53mm verkürzen, das ist absolut normal!

Möchten man den Abbildungsmaßstab um den Wert 1 erhöhen, z.B. von 2 auf 3 (2:1 auf 3:1), dann erhöht man den Auszug um den Wert der Brennweite des Objektivs, dies auch dann, wenn man den Abbildungsmaßstab von 4:1 auf 5:1 erhöht usw..

Bei jeder Erhöhung des Abbildungsmaßstabes im vergrößernden Bereich um 1, muss der Auszug um die Brennweite des Objektivs erhöht werden.

Dies ist für Fotografen, die mit Grossformatkameras im vergrößernden Maßstab arbeiten, täglich Brot.

Zur Messung der Brennweite wird ein Balgen benötigt.

Der Balgen wird so eingestellt, dass das in der Brennweite unbekanntes Objektiv im Maßstab 1:1 abbildet. Der Auszug des Balgens wird notiert.

Nun wird der Abbildungsmaßstab anhand des Bildausschnittes um 1 erhöht, also auf 2:1 und der Balgenauszug ein weiteres Mal gemessen.

Die Differenz der Balgenauszuglänge bei 2:1 zu 1:1 entspricht der Brennweite des Objektivs!

So kann z.B. das Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D ausgemessen werden. Wird das Objektiv in der Stellung "unendlich" an einem Balgen bei 1:1 eingesetzt, muss der Balgenauszug 105mm betragen.

Bei einer Erhöhung auf 2:1 muss der Auszug des Balgens um weitere 105mm erhöht werden.

Erhöhung des Auszuges um 105mm sagt aus, dass die Brennweite des Objektivs 105mm beträgt.

Es zeigt sich, dass die Ermittlung der Brennweite auf diese Weise auch bei Teleobjektiven, die eine verkürzte Bauweise besitzen, gelingt. Zu beachten ist, dass Makroobjektive mit grosser Brennweite selten als Teleobjektiv konstruiert sind.

Auch bei asymmetrischen Objektiven ist die gegenstands- und die bildseitige Brennweite gleich gross.

Bei Retrofokus wird dadurch eine Veränderung des Freiraumes zwischen hinterster Linse und Filmebene (Chipebene), Platz für den Spiegel und dergleichen geschaffen. Die hintere Hauptebene des Objektivs wird nach hinten verlagert, es wird dadurch eine verlängerte Schnittweite erreicht, dies mit einer grösseren Austrittspupille (Pupillenmassstab grösser 1).

Die Distanz zwischen hinterer Hauptebene und Chipebene verändert sich somit nicht. Die Tele- und Retrobauweise verändern somit nichts an der zusätzlichen Auszugslänge, die benötigt wird, um den Abbildungsmassstab um 1 zu erhöhen.

Wird das Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D bei der Stellung 1:3 am Objektiv eingesetzt (Schalter auf LIMIT), benötigt es für 1:1 einen Balgenauszug von 55mm. Bei einer Erhöhung auf 2:1 muss der Auszug des Balgens um 91mm erhöht werden. Erhöhung des Auszuges um 91mm sagt aus, dass die Brennweite bei Stellung 1:3 des Objektivs, 91mm beträgt.

Um auf einen Abbildungsmassstab von 3:1 zu gelangen, benötigt es ebenfalls eine zusätzliche Auszugsverlängerung von weiteren 91mm.

Bei der Fokussierung auf eine nähere Distanz (1:3 oder 0.475m), verkürzt sich bei diesem Objektiv die Brennweite gut erkennbar von 105mm auf 91mm.

Wird das Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D bei der Stellung 1:1 am Objektiv eingesetzt, benötigt es für 1:1 keinen Balgen oder Zwischenringe.

Die Distanz zwischen Gegenstandsebene und Bildebene beträgt 303mm.

Teilt man 303mm durch 4 erhält man eine Brennweite von 76mm.

Um zu einem Abbildungsmassstab von 2:1 zu gelangen sind 76mm Balgen notwendig. Das Objektiv besitzt somit bei Stellung 1:1 (0.314m) eine Brennweite von 76mm. Nikon nennt 75.7mm.

Manchmal ist erwünscht, dass der freie Arbeitsabstand möglichst hoch ist.

Wer im Freiland fotografiert, möchte eine möglichst kompakte Ausrüstung und liebt Balgen oder Zwischenringe nicht. Im Studio können Balgen und Zwischenringe problemloser eingesetzt werden.

Wird das Nikon AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D bei 1:1 eingesetzt beträgt die Brennweite 76mm und der freie Arbeitsabstand 135mm.

Steht beim Objektiv die Fokusdistanz auf 1:3, beträgt die Brennweite 91mm und es werden 55mm Balgen oder Zwischenringe für 1:1 verwendet, der freie Arbeitsabstand beträgt 143mm.

Steht beim Objektiv die Fokusdistanz auf unendlich, dann hat das Objektiv tatsächlich eine Brennweite von 105mm. Dann muss für 1:1 eine Balgenlänge von 105mm verwendet werden, der freie Arbeitsabstand beträgt dann 155mm.

Also einen um 20mm höheren freien Arbeitsabstand, als wenn es ohne Balgen bei 1:1 eingesetzt wird.

Essenz:

Die Erhöhung des Auszuges um die Brennweite des Objektivs erhöht den Abbildungsmaßstab um 1 (z.B. von 3:1 auf 4:1).

Umgekehrt:

Die Distanz um welche der Auszug erhöht werden muss, um den Abbildungsmaßstab um 1 zu erhöhen (z.B. von 2:1 auf 3:1), entspricht der Brennweite des Objektivs.

Test: ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2

Das 100mm Objektiv, das speziell für Makro gerechnet ist, schliesst bei Tests so gut ab, dass es als Referenzobjektiv gilt. Bei vorgesehenem Gebrauch ist es von unendlich bis zu einem Abbildungsmassstab von 1:2 unbestritten die beste Wahl.

Um von 1:2 mit Zwischenringen auf 2:1 zu kommen, benötigt das edle Teil etwa 16cm Zwischenringe, das AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D, lediglich 7cm!

Getestet wurde das ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2 an einer Nikon D810.

In der Bildmitte löst es mit Balgen bei 2:1 etwa 5% höher auf als das AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D und besitzt einen etwas höheren, sichtbaren Kontrast.

In den Ecken ist es sichtbar schlechter, viele CA's und eine sichtbar geringere Auflösung! Striche vom Test-Target die zur Bildmitte gehen (sagittal), sind in etwa akzeptabel aufgelöst, Striche die quer zur Bildmitte stehen (tangential), verschwimmen ineinander. Dies bei Blende 2.8, 4, 5.6 oder 8.

Wird ein modernes, hochauflösendes Mikroskopobjektiv, bei einer von der Nennvergrößerung abweichenden Vergrößerung eingesetzt, wird die Abbildungsleistung sehr schnell schlechter.

Dieses sehr gute Foto-Makroobjektiv ist somit für den Einsatz mit Balgen/Zwischenringen bei einem vergrößernden Abbildungsmassstab, entgegen einer berechtigten Annahme zur Eignung, überraschenderweise nicht geeignet. Es zeigt, dass eine Verlängerung des Auflagemasses durch Verwendung von Balgen/Zwischenringen, sich nicht so bewährt wie bei anderen 100mm Objektiven. Die Qualität des Objektivs ist im Bereich 1:2 bis unendlich derart optimiert, dass es bei Anwendung ausserhalb dieses Bereiches eine stark verminderte Qualität zeigt, dies im Vergleich zu anderen Objektiven, die nicht so stark optimiert sind und mit Balgen/Zwischenringen bis zu einem Abbildungsmassstab von etwa 3:1 gute Ergebnisse zeigen.

Es zeigt sich hier klar und deutlich, dass ein Objektiv beim gewünschten Abbildungsmassstab geprüft werden muss!

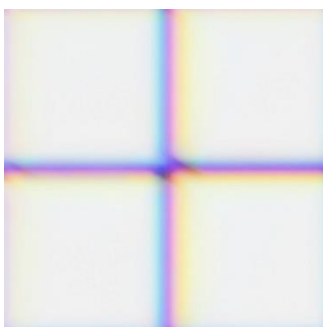
Die Vergleichsbilder zeigen beim Abbildungsmassstab von 2:1 einen Ausschnitt der linken oberen Ecke.

Von links nach rechts:

ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2

AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D

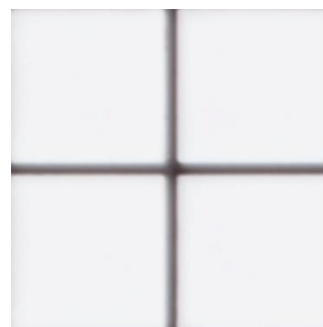
Rodenstock APO-Rodagon N 50mm, 1:2.8 in Retro



ZEISS Macro-Planar T* 2/100mm ZF.2



AF MICRO NIKKOR 105mm 1:2.8 D



Rodenstock APO-Rodagon N 50mm, 1:2.8

Wie das Beispiel gut zeigt, ist es nicht möglich, von der Qualität eines Objektivs in einem Bereich, auf die Qualität des Objektivs in einem anderen Bereich zu schliessen.

Um sich Klarheit zu verschaffen, gibt es für den Hobby Fotografen einige Möglichkeiten von Tests, die er selber zu Hause anwenden kann.

Hier ist nicht in erster Linie die Rede von Vergleichen, die man anhand von Vergleichsbildern der Natur anstellen kann, sondern ich versuche hier Vergleichsmöglichkeiten aufzuzeigen, die einen Unterschied klar zeigen und auch jederzeit unter einigermassen gleichen Testbedingungen, repräsentative und reproduzierbare Ergebnisse zeigen und somit einfach nachvollziehbar sind.

Mikroskopobjektive sind in ihrer Abbildungsleistung auf die Bildmitte optimiert, da bei Betrachtung mit dem Auge der gewünschte Objektausschnitt in die Bildmitte gerückt werden kann. Sie besitzen einen Bildkreis von etwa 20mm Durchmesser und sind deshalb für eine DSLR mit Crop-Faktor 2 mit einer Bilddiagonale von 21.6mm geeignet. Kommt eine Kamera mit Crop-Faktor 1.5 zum Einsatz, mit einer Bilddiagonale von 28.2mm, kann es in den Bildecken deshalb schon kritisch werden und eine Vollformatkamera mit Bilddiagonale von 43.3mm ist absolut ungeeignet, ausser das Objekt ist rund und der Bereich des Interesses befindet sich vorwiegend in der Bildmitte.

Klar wird dadurch, dass bei der Fotografie nicht die Bildqualität in der Bildmitte der entscheidende Punkt für die Eignung ist, sondern die Bildecken sollen eine noch akzeptable Qualität aufweisen.

Dies erklärt auch, weshalb ein sehr gutes Mikroskopobjektiv nicht unbedingt auch für die Fotografie, die auch einen hohen Qualitätsanspruch an die Bildecken stellt, geeignet ist.

Messungen sind deshalb immer auch in den Bildecken vorzunehmen. Am besten in allen vier Ecken, denn dadurch wird auch ersichtlich, ob der optische Aufbau gut zentriert ist. Ob ein Objektiv für die Fotografie geeignet ist, zeigt sich somit in den Bildecken!

Ein Test-Target muss zur Beurteilung des Bildes mittels Focus-Stacking fotografiert werden. Dazu wähle ich 10 Bilder innerhalb der Schärfentiefe des Objektivs und stacke die Bilder, die scharf abgebildete Bereiche besitzen. So ist auch bei leichter Schräglage des Targets ein verlässliches Bild machbar.

Ebenfalls entspricht der Vorgang des Stackens auch dem eigentlichen Einsatz des Objektivs beim Focus-Stacking!

Test: Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X**Test: Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens**

Objektivvergleich bei 4:1

Kamera, Nikon D810 Vollformat

CA (Chromatische Aberration)

Den Anlass dieses Vergleichstests bei 4:1, gab das Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X und das Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens, beide für Vollformat gerechnet.

Für diesen Vergleichstest verwendete ich Objektive, die im Bereich von 4:1 sehr gute Resultate erzielen.

Zusätzlich noch eine sehr kostengünstige Möglichkeit mit einem 24mm Objektiv in Retro. Keine dieser Vergleichslösungen ist im Aufbau so kompakt wie das Mitakon.

Distanz zwischen Objektivanschluss der Kamera bis Frontlinse bei 4:1:

60 mm, Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens

115mm, Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5.0X

150 mm, NIKKOR 24mm 1:2.8 in Retro

210 mm, Zeiss, Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13

275 mm, Rodenstock, APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (in Retro)

Ein Unterschied im Setup besteht darin, dass bei allen ausser dem Mitakon 20mm und dem Laowa 25mm, Zwischenringe verwendet werden müssen.

Das Laowa 25mm und das Mitakon 20mm wurden bei unterschiedlichen Blenden ausgemessen und für den Vergleich die in der Bildmitte am höchsten auflösende Blende gewählt wurde, bei welcher die Auflösung in den Ecken bei Vollformat nicht unter 80% abfällt.

Dies ist beim Laowa 25mm und beim Mitakon 20mm die Blende 2.8.

Der Koch prüft seine Speisen indem er sie kostet, der Fotograf beurteilt seine Bilder mit dem Auge.

Die folgenden Vergleichsbilder zeigen beim Abbildungsmaßstab von 4:1 einen Ausschnitt der linken oberen Ecke.

Folgende Bilder von links oben nach rechts unten:

Rodenstock, APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (in Retro), Blende 4.0

Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens, Blende 2.8

Zeiss, Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13, Blende 4.0

NIKKOR 24mm 1:2.8 in Retro, Blende 5.6 (löst am höchsten bei 4:1 auf)

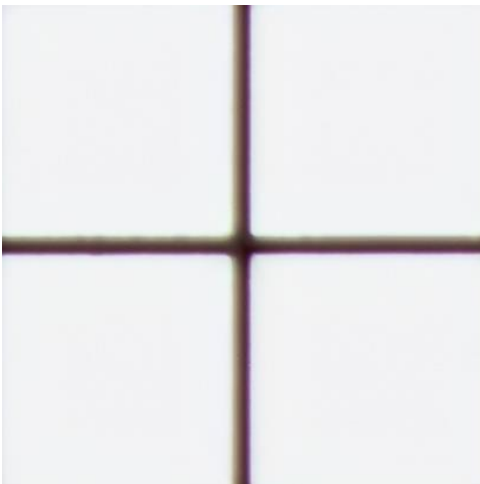
Laowa 25mm F2.8, Ultra Macro 2.5-5X, Blende 2.8



Rodenstock APO-Rodagon N
50mm, 1:2.8



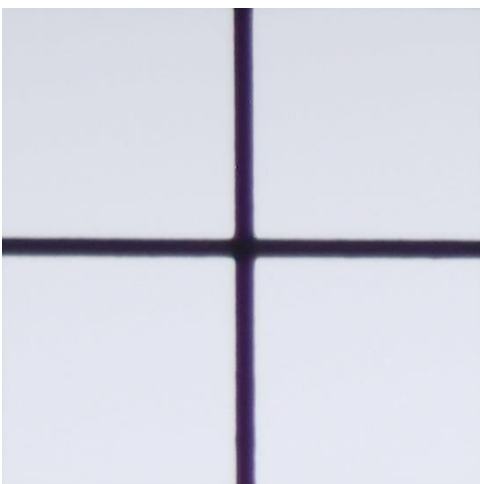
Zhongyi Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro



Zeiss Luminar 40mm, 1:4/A0.13



NIKKOR 24mm 1:2.8 in retro

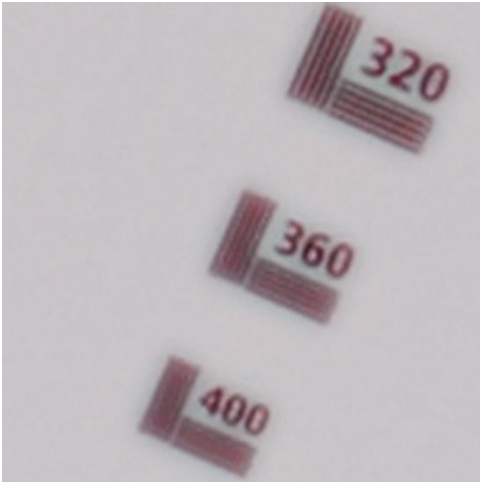


Laowa 25mm F2.8, Ultra Macro 2.5-5X

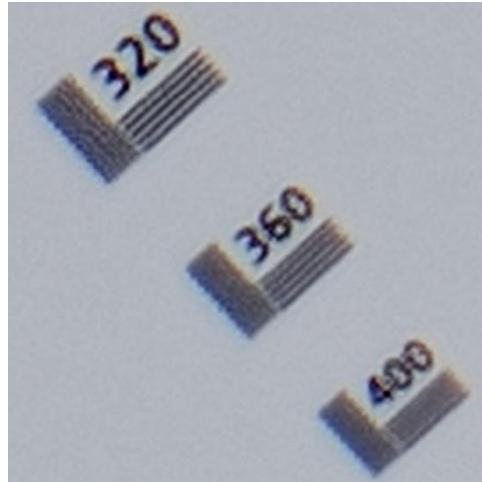
Das Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X zeigt sogar bei offener Blende extrem gute Resultate in den Ecken an Vollformat. Von den getesteten Objektiven zeigt es am wenigsten Farbränder durch chromatische Aberration.

Auflösung

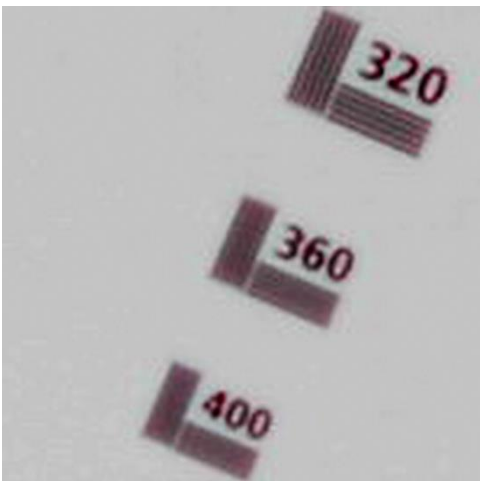
Die Vergleichsbilder zeigen beim Abbildungsmaßstab von 4:1, die Auflösung in der Bildmitte.



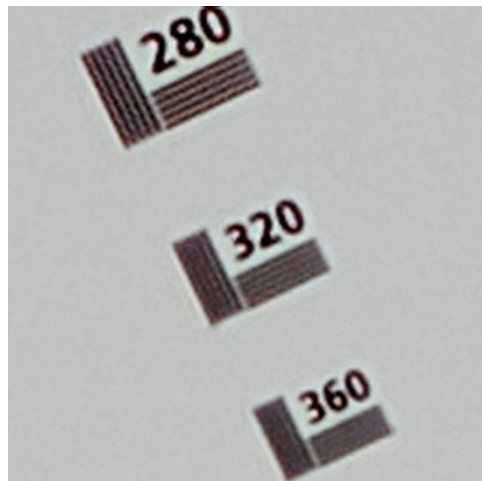
Rodenstock APO-Rodagon N
50mm, 1:2.8



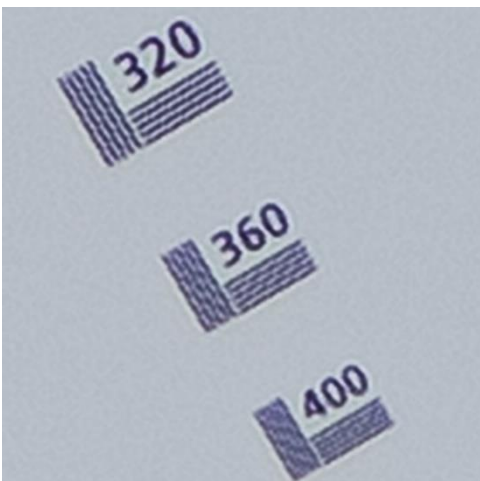
Zhongyi Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro



Zeiss, Luminar 40mm, 1:4/A0.13

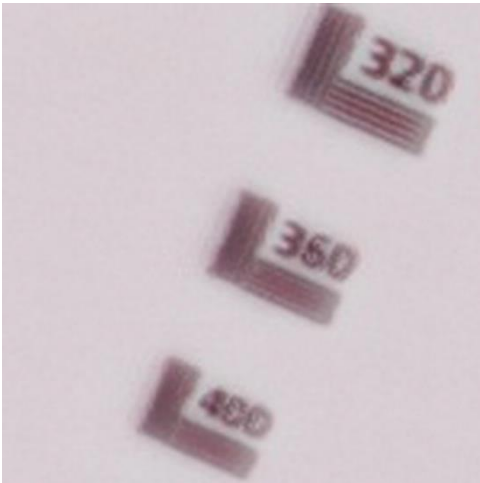


NIKKOR 24mm 1:2.8 in retro

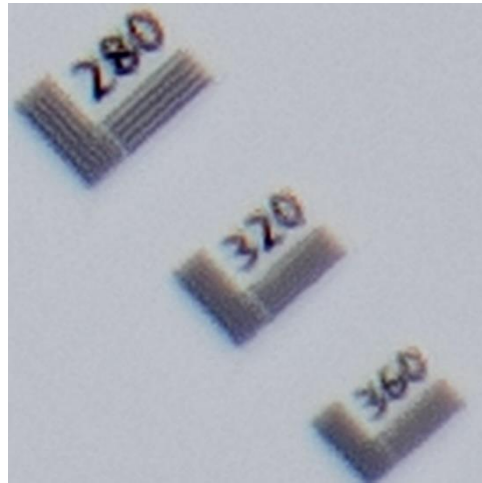


Laowa 25mm F2.8, Ultra Macro 2.5-5X

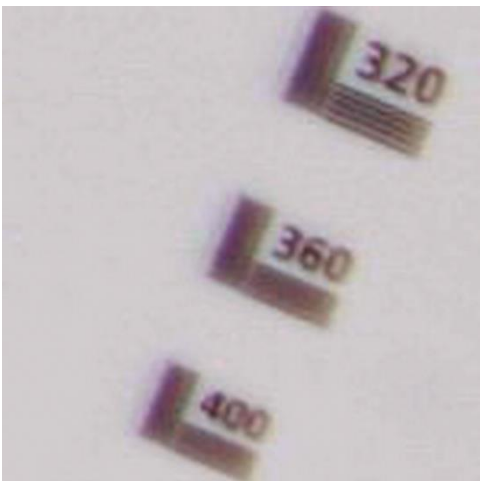
Die Vergleichsbilder zeigen beim Abbildungsmaßstab von 4:1, die Auflösung in der linken oberen Ecke.



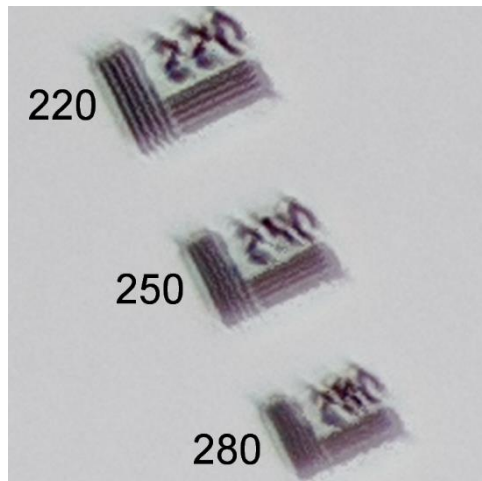
Rodenstock APO-Rodagon N
50mm, 1:2.8



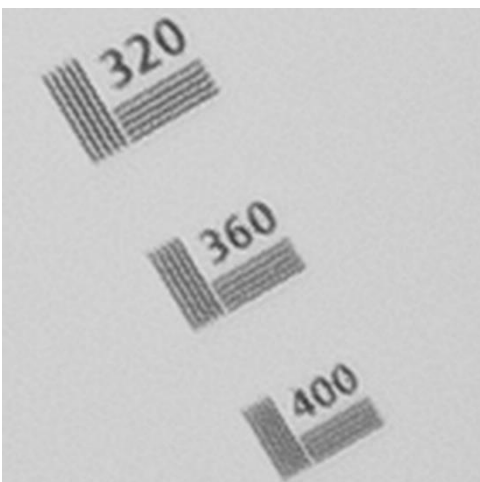
Zhongyi Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro



Zeiss, Luminar 40mm, 1:4/A0.13



NIKKOR 24mm 1:2.8 in retro



Laowa 25mm F2.8, Ultra Macro 2.5-5X

Zu beachten ist, dass in den Vergleichsbildern ein unterschiedlicher Bereich abgebildet ist und zur besseren Erkennung entsprechend unterschiedlich für die Darstellung vergrößert wurden.

Die Vergleiche der Auflösung unterscheiden sich klar erkennbar von Vergleichen, die ein dafür bestens eingerichtetes Labor herstellen kann. Zu beachten ist bei den Auflösungsvergleichen, dass ich entsprechend einer möglichen Bildbearbeitung und ebenfalls zur klar sichtbaren Darstellung hier, den Kontrast und die Tonwerte so verändert habe, dass hier die Unterschiede in der Auflösung und Abbildungsleistung klar sichtbar werden und bei jedem Objektiv das Maximum an Auflösung sichtbar wird.

Freier Arbeitsabstand:

20 mm,	Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens
32 mm,	Zeiss, Luminar 40mm, Version 3, 1:4/A0.13
42mm,	Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X
45 mm,	NIKKOR 24mm 1:2.8 in retro
46 mm,	Rodenstock, APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (in Retro)

Je nach Objekt ist ein hoher freier Arbeitsabstand für eine optimale Beleuchtung dienlich. Das Objektiv, Zhongyi Optics, Mitakon 20mm f/2 4.5X Super Macro Lens ist handlich und klein. Das ist bei Aussenaufnahmen sehr gut, doch 4:1 im freien Feld geht nicht ohne Stativ und bei der geringen Schärfentiefe nur selten ohne Focus-Stacking. Also ein Objektiv fürs Studio, wo es aber auf die Kleinheit des Objektivs nicht so sehr ankommt!

Das Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X reiht sich unter die besten Objektive bei 4:1 ein.

Es ist sowohl in der Bildmitte, als auch in den Bildecken an Vollformat von der Abbildungsleistung dem Rodenstock, APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (in Retro) leicht überlegen.

7:1

Das Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X mit Blende 2.8 und Zwischenringen ist vergleichbar mit dem Rodenstock, APO Rodagon 1:2.8, f = 50mm (in Retro).

Verwendet man das Zhongyi Mitakon 20mm f/2.0 mit Zwischenringen bei 7:1, da ist die Blende 2.0 die am höchsten auflösende Blende (dies auch in den Ecken), dann zeigt es in der Bildmitte eine im Vergleich zum Rodagon 50mm (Retro, 7:1) um etwa 10% niedrigere Auflösung und in den Ecken sinkt sie gegenüber dem Rodagon um etwa 25% ab. Auch hier wäre das Zhongyi Mitakon 20mm f/2.0 an einer Crop-Kamera besser aufgehoben.

Beim Laowa 25mm F2.8 Ultra Macro 2.5-5X beträgt der Preis etwa das Doppelte vom Zhongyi Mitakon 20mm f/2.0, belohnt aber mit einer Bildqualität, die alles überbietet, was ich bisher in diesem Bereich des Abbildungsmaßstabes gemessen und gesehen habe.

Schlussendlich muss sich in der Praxis auch der Charakter der Objektive zeigen. Die Zukunft wird zeigen, ob mir ihre Bilder gefallen.

Literaturverzeichnis:

Jost J. Marchesi
PHOTOKOLLEGIUM
Band 1 - 6
Verlag Photographie
D-82205 Gilching
ISBN 978-3-943125-44-3
"Dient zur Ausbildung zum Fotografen"

Die wissenschaftliche und angewandte Photographie
Herausgegeben von Kurt Michel
Erster Band
Johannes Flügge
Das photographische Objektiv
Springer-Verlag Wien GmbH 1955
ISBN 978-3-7091-8026-6

Die wissenschaftliche und angewandte Photographie
Herausgegeben von Kurt Michel
Zehnter Band
Kurt Michel
Die Mikrophotographie
Springer-Verlag Wien GmbH 1962
ISBN 978-3-662-27472-9

Jürgen Gulbins, Rainer Gulbins
Multishot-Techniken in der digitalen Fotografie
Hochwertige Aufnahmen aus Bildserien
dpunkt.verlag
ISBN 978-3-89864-552-2

Diverse Autoren
Mikro Fotografie
Schönheit jenseits des Sichtbaren
Herausgegeben von Ludger Derenthal und Christiane Stahl
HATJE CANTZ Verlag
ISBN 978-3-7757-2678-8

Diverse Autoren
Herausgegeben von Juliet Hacking
FOTO, Fotografie die ganze Geschichte
DUMONT
ISBN 978-3-8321-9461-1

Dr. Kyra Säger, Dr. Christian Säger
Das Geheimnis beeindruckender Makrofotos
DATA BECKER
ISBN 978-3-8158-2629-4

Prof. Dr. Werner Nachtigall
Mikroskopieren
Geräte, Objekte, Praxis
BLV Verlagsgesellschaft mbH
ISBN 3-405-14592-9

Alexander Linnemann, Susanne Kühl (Hrsg.)
Grundlagen der Licht- und Elektronenmikroskopie
Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
UTB Band-Nr. 4864
ISBN 978-3-8252-4864-2

Ekbert Hering, Rolf Martin (Hrsg.)
Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler
Grundlagen und Anwendungen
Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag
ISBN 978-3-446-44281-8

Clément Chéroux
Henri Cartier-Bresson
Der Schnappschuss und sein Meister
Schirmer / Mosel
ISBN 978-3-8296-0377-5

Karl Blossfeldt
Urformen der Kunst, Wundergarten der Natur
Das fotografische Werk in einem Band
Schirmer / Mosel
ISBN 978-3-88814-718-0

Dr. Heinrich Frieling
Das Gesetz der Farbe
Musterschmidt-Verlag, Göttingen, Frankfurt, Zürich
ASIN: B0000BR2HK

Dr. Eduard Rüchardt
Sichtbares und unsichtbares Licht
Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg
ASIN: B015SYS6W6

Rudolf Hillebrand, Hans Joachim Hauschild
KOMPENDIUM
Das Handbuch der Nikon-Fototechnik
Verlag Photographie AG
CH-8201 Schaffhausen
Schweiz
ISBN 3-7231-0013-9

John Hedgecoe
Fotografieren
Die neue grosse Fotoschule
Dorling Kindersley Verlag GmbH
München
ISBN 978-3-8310-1311-1

Interessante Links im Internet:

Andreas Hurni

Allgemein zur Fotografie.

<https://www.andreashurni.ch/index2.html>

Rolf Badenhausen

Artikel betreffend der Auflösung in der analogen und digitalen Fotografie.

<http://www.badenhausen.net/rolf-badenhausen/Pixelmania.htm>

Optotek

Daten zu Nikon Mikroskop Objektive (M Plan und andere)

http://www.optotek.net/Microscope_Inventory/Objective_Lenses/Optotek____Nikon_Objectives/optotek____nikon_objectives.html

Tabellen mit Formeln

Grösse der Stackschritte in Millimeter

(für Bilder mit einer sehr hohen Klarheit und Schärfe, verwendet man die Hälfte der unten stehenden Werte)

Abbildungs- massstab	Blende	2.8	3.4	4	4.8	5.6	6.7
01:01		0.0747	0.0961	0.1067	0.1357	0.1493	0.1922
02:01		0.028	0.036	0.04	0.0509	0.056	0.0721
03:01		0.0167	0.0214	0.0237	0.0302	0.0333	0.0428
04:01		0.0117	0.015	0.0167	0.0212	0.0233	0.03
05:01		0.009	0.0115	0.0127	0.0163	0.018	0.0231
06:01		0.0073	0.0094	0.0103	0.0133	0.0147	0.0187
07:01		0.006	0.0078	0.0087	0.0111	0.0123	0.0157
08:01		0.0053	0.0069	0.0077	0.0097	0.0107	0.0136
09:01		0.0047	0.006	0.0067	0.0085	0.0093	0.012

Anzahl Stackschritte mit StackShot (ein Schritt = 0.000496mm)

(für Bilder mit einer sehr hohen Klarheit und Schärfe, verwendet man die Hälfte der unten stehenden Werte)

Abbildungs- massstab	Blende	2.8	3.4	4	4.8	5.6	6.7
01:01		151	194	215	274	301	388
02:01		56	73	81	103	113	145
03:01		34	43	48	61	67	86
04:01		24	30	34	43	47	61
05:01		18	23	26	33	36	47
06:01		15	19	21	27	30	38
07:01		12	16	17	22	25	32
08:01		11	14	15	20	22	27
09:01		9	12	13	17	19	24

Markierte Werte gelten für eine maximale Auflösung beim Rodenstock APO Rodagon (N) 1:2.8, f = 50mm (in Retro)

Berechnung der Schärfentiefe:

$$2 \cdot u \cdot K \cdot (M+1) / M^2$$

$$u = 0.02$$

K = nominale Blende (die am Objektiv eingestellte Blende)

M = Abbildungsmassstab

Einen Rechner für die Ermittlung der Stackschrittgrösse, findet man unter:

www.focus-stacking.com/A/Schaerftiefe_Kurt_Wirz.xls

Ich verwende folgende Einstellungen:

Anzahl Bilder in ST = 3 oder 6 3 für gute Bilder, 6 für sehr klare Bilder.

Ab einem Abbildungsmaassstab von 10:1 wird die Gösse der Stackschritte nach der Apertur gewählt.

Apertur / Grösse der Stackschritte im mm / Anzahl Schritte beim StackShot

0.2 / 0.0046 / 9

0.25 / 0.0029 / 6

0.3 / 0.002 / 4

0.35 / 0.0015 / 3

0.4 / 0.0012 / 2

0.45 / 0.001 / 2

0.5 / 0.0007 / 1

0.55 / 0.0006 / 1

0.6 / 0.0005 / 1

0.65 / 0.00043

0.7 / 0.00037

0.75 / 0.00033

0.8 / 0.00029

Auch hier gilt: Für Bilder mit einer sehr hohen Klarheit und Schärfe, verwendet man halb so grosse Schritte.

Formeln:**Blendenwert, Brennweite, Blendendurchmesser:**

Blendenwert = Brennweite / Blendendurchmesser

Blendendurchmesser = Brennweite / Blendenwert

Brennweite = Blendenwert X Blendendurchmesser

Beispiel:

Luminar 25mm 1:3.5

Blendendurchmesser = 25mm / 3.5 = 7.14mm

Zum Verständnis:

Der Blendenwert 1:3.5 ist gleichbedeutend wie Blende 3.5

Blendenwert = Blende

Brennweite, wenn zwei Objektive hintereinander montiert werden.

Formel für EXCEL:

=1/((1/Brennweite 1.Objektiv)+(1/Brennweite 2.Objektiv))

Beispiel:

Ein Luminar 25mm 1:3.5 wird auf ein Fotoobjektiv mit Brennweite 105mm aufgesetzt.

Brennweite = $1 / ((1/25)+(1/105)) = 1 / (0.04+0.0095) = 1 / 0.0495 = 20.2\text{mm}$

Die Brennweite dieser Kombination beträgt 20.2mm.

Bei grösserem Blendenwert erhöht sich die Auflösung. Wird nun das Luminar 25mm 1:3.5 auf ein 105mm Objektiv mit offenster Blende aufgesetzt, dann beträgt die Brennweite der Kombination 20.2mm.

Da sich der Durchmesser in Millimeter der Blende des Luminars nicht verändert hat, ist somit der Blendenwert kleiner.

Beim Luminar 25mm 1:3.5 mit Linsendurchmesser 7.14mm, beträgt der Blendenwert:
 $25\text{mm} / 7.14 = 3.5$.

Bei der Kombination Luminar 25 mit 105mm Objektiv, rechnet sich:

$20.2\text{mm} / 7.14 = 2.83$

Mit der Kombination erhält man ein "Luminar 20.2mm 1:2.83".

Ein Blendenwert von 2.83 löst höher auf als Blende 3.5!

Zum Verständnis:

Der Blendenwert 1:3.5 ist gleichbedeutend wie Blende 3.5

Blendenwert = Blende

Tandemstellung von Objektiven

Bei der Tandemstellung wird auf ein normal montiertes Objektiv mit einem Zwischenring (Filtergewinde auf Filtergewinde) ein zweites Objektiv umgekehrt montiert.

Brennweite / Brennweite = Vergrößerungsfaktor

Beispiel:

Auf ein normal montiertes 100mm Objektiv wird mit Adapter ein 24mm Objektiv in Retro montiert.

Dies ergibt einen Abbildungsmaßstab von $(100\text{mm} / 24\text{mm} = 4,2)$ etwa 4:1.

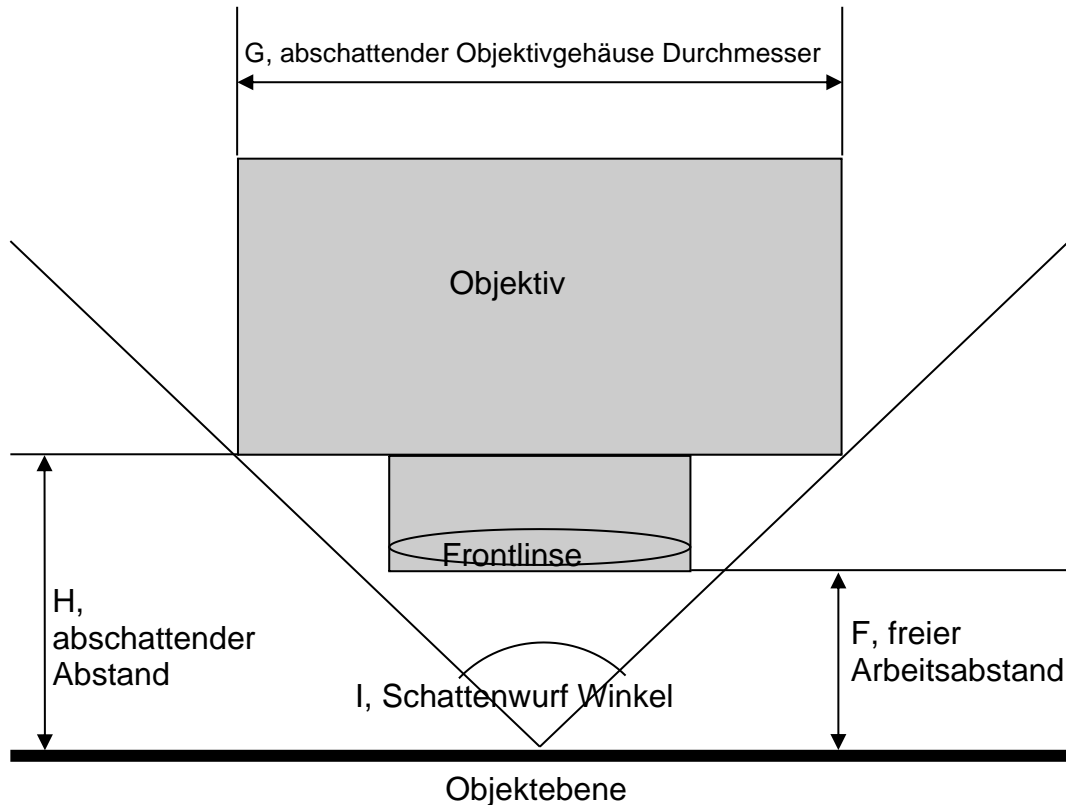
Die Auflösung in der Bildmitte dieser Kombination ist 20% geringer als beim Luminar 40mm und in den Ecken sinkt sie noch einmal um etwa 30%.

Der freie Arbeitsabstand ist etwa doppelt so hoch wie beim Luminar 40mm, also etwa 40mm.

Die Tandemlösung bringt in etwa die gleiche Leistung, wie wenn das 24mm Objektiv alleine in Retro verwendet wird, sie ist also keinen Vorteil.

Berechnung des Abschattungswinkel mit EXCEL(I, Schattenwurf Winkel)

=ARCTAN(((G. Objektiv Durchmesser/2)/H. Distanz zuAbschattungsdurchmesser))*180/PI()*2

**Umrechnung Blende, Numerische Apertur (NA)**

$$NA = 1 / (2 \times \text{Blendenzahl})$$

$$\text{Blendenzahl} = 1 / (2 \times NA)$$

Beispiel

$$NA = 1 / (2 \times 4.5) = 1 / 9 = 0.111$$

$$\text{Blendenzahl} = 1 / (2 \times 0.111) = 1 / 0.222 = 4.5$$

Schärfentiefe bei Mikroskop Objektiven

$$\lambda / (NA \times NA) = \text{Schärfentiefe in mm}$$

$$\lambda = \text{Lichtwellenlänge} = 0.00055\text{mm}$$

Beispiel

$$0.00055\text{mm} / (0.3 \times 0.3) = 0.00055\text{mm} / 0.09 = 0.00611\text{mm} = 6.11\mu\text{m}$$

Grösse der Stackschritte

Für gut aufgelöste Bilder: Schärfentiefe / 3

Für knackig scharfe Bilder: Schärfentiefe / 6

Anzahl StackShot Schritte

1 StackShot Schritt beträgt 0.000496mm

Beispiel

Anzahl StackShot Schritte für 1 mm = $1 / 0.000496\text{mm} = 2016$

Bei einer Apertur von 0.3 beträgt die Schärfentiefe 0.00611mm, bei 3 Bildern innerhalb der Schärfentiefe müssen die Schritte im Abstand von 0.002mm erfolgen, das sind 4.1 StackShot Schritte.

Auflösung in LP/mm

$1 / (\text{Lichtwellenlänge} / (2 \times \text{NA}))$

Beispiel:

$1 / (0.00055\text{mm} / (2 \times 0.3)) = 1 / (0.00055\text{mm} / 0.6) = 1 / 0.0009166 = 1091 \text{ LP/mm}$

"Messen" der **Schärfentiefe** im Abbildungsmaßstab 1:1 bis 10:1 mit Lupen- oder Vergrößerungsobjektiven:

Kann man die reale Auflösung eines Objektes durch ein Objektiv messen, dann ist es möglich die Schärfentiefe an Hand der Auflösung (LP/mm) zu berechnen.

Schärfentiefe (mm) = $\lambda / ((\text{LP/mm} \times \lambda) \times (\text{LP/mm} \times \lambda) / 4)$

λ = Lichtwellenlänge in Millimeter z.B. 0.00055 mm.

Beispiel:

Beträgt die gemessene Auflösung des Objektes 300LP/mm

$0.00055 / ((300 \times 0.00055) \times (300 \times 0.00055) / 4) = 0.0808$

Wird eine Auflösung von 300LP/mm gemessen, dann beträgt die Schärfentiefe 0.0808mm.

LeA (Liste einiger Abkürzungen)

Profis und Amateure verwenden auch in Foren Abkürzungen, die oft, auch für Fotografen und natürlich Anfänger, unverständlich sind.

Will man etwas mitteilen, dienlich sein und verstanden werden, dann sollte man solche Abkürzungen nach Möglichkeit vermeiden!

Diese Liste dient nicht dazu, solche Abkürzungen anzuwenden, sondern um sie zu verstehen!

1:2 = Verkleinerung, die Realität ist doppelt so gross wie die Abbildung auf dem Chip.

1:1 = Die Realität ist gleich gross wie die Abbildung auf dem Chip.

2:1 = Vergrösserung, Die Realität ist halb so gross wie die Abbildung auf dem Chip.

Die hier erwähnte Zahl "2" kann durch jede beliebige Zahl ersetzt werden, sie vergrössert oder verkleinert den Abbildungsmassstab entsprechend.

ABM = Abbildungsmassstab

AF = Auto-Fokus

AG = Artengalerie

APO = Achromat, höchster Grad der Korrektur der sphärischen und chromatischen Aberrationen

amS = aus meiner Sicht

APS = Advanced Photo System, kleineres Bildformat für Kameras wie Vollformat

APS-C = Bildsensor Cropfaktor von 1,5 oder 1,6

BG = Bildgestaltung

CA = Chromatische Aberration, Farbbränder vor allem im Bereich des Bildrandes

CF = chromatic-aberration free, Farbfehlerfrei

CFI = chromatic-aberration free infinity, farbfehlerfreies unendlich Objektiv

CZJ = Carl Zeiss Jena

DFF = Deep fokus fusion, Focus Stacking

DSLR = Digital Single Lens Reflex, digitale Spiegelreflexkamera

DOF = Depth of Field, Schärfentiefe oder Tiefenschärfe

EBV = Elektronische Bildverarbeitung, Bildbearbeitung am Computer

ELWD = Extra long working distance, speziell grosser freier Arbeitsabstand

EPI = Objektivbezeichnung, für Auflicht, Hellfeld und ohne Deckglas geeignet

ETTR = Expose To The Right, nach rechts belichten, hell belichten

Exif = Exchangeable Image File Format, enthält technische Daten zum Bild

FF = full format, Vollformat entspricht dem analogen 35mm Film, 36x24mm

FV = Farbverlauf

Geli = Gegenlichtblende oder Sonnenblende

HDR = High Dynamic Range, Bild mit hohem Dynamikumfang

HF = Hochformat

HG = Hintergrund

HKV = Helligkeitsverlauf

HP = Home Page, Website, Auftritt im Internet

ICS = infinity corrected system, auf unendlich korrigiertes System

ISO = International Organization for Standardization, Lichtempfindlichkeit der Kamera

kNB = kontrolliertes Naturbild

LWD = Long working distance, grosser freier Arbeitsabstand

M = Metallurgical objectives (210mm), Auflicht Objektiv

m.E. = meines Erachtens, so wie ich es empfinde

ML = Morgenlicht

MF = Makro Forum
MFT = Microfourthird-Sensoren, Crop Faktor 2
MP E 65 = Canon Makro Objektiv: MP-E 65mm f/2.8 1-5x Macro Photo
NA = Numerische Apertur
NB = Naturbild
Nerd = Schwachkopf, Computerfreak, wird auch im positiven Sinne verwendet
PL = Plan, Flat field, für flache Objekte korrigiert
PLAN = Plan, Flat field, für flache Objekte korrigiert
QF = Querformat
RAW = Rohdatenformat der digitalen Kamera, weitgehendst unverändert
SE = Schärfenebene
SF = Sensorfleck
SLWD= Super long working distance, absolut grösster freier Arbeitsabstand
SR = Schärfungsränder
ST = Schärfentiefe
SV = Schärfeverlauf
SVA = Spiegelvorauslösung
TWA = Tonwert Abriss, abrupte Helligkeits- oder Farbveränderungen in einem Verlauf
User = Anwender
UIS = universal infinity system, universelles unendliches System
ULWD= ultra long working distance, ultra grosser freier Arbeitsabstand
usw. = und so weiter
UW = ultra wide, speziell grosser Bildkreis
VF = Vollformat entspricht dem analogen 35mm Film, 36x24mm
VG = Vordergrund
WA = Weissabgleich
WB = White Balance, Weissabgleich
WD = Working distance, freie Arbeitsdistanz
ZR = Zwischenringe

Weitere Abkürzungen, die für Mikroskopobjektive gelten, findet man hier:

<https://www.microscopyu.com/microscopy-basics/microscope-objective-specifications>

Lieferanten:

-Umkehring für Rodagon Vergrößerungsobjektiv an Fotokamera:

COMA

COSTRUZIONI OTTICHE MECCANICHE

www.adrianolli.com

<https://www.adrianolli.com/articolo.asp?ID=5502>

- Diverse Objektivadapter:

José Meneses

Rua Principal, 395

Albergaria

3040-554 Antanol - Coimbra

Portugal

www.customphototools.com

-Adapter für Mikroskopobjektive an Fotokamera:

COMA

COSTRUZIONI OTTICHE MECCANICHE

www.adrianolli.com

Für Nikon Kamera:

<https://www.adrianolli.com/articolo.asp?ID=3766>

Articolo 3766, " Adattatore foto ottiche microscopio RMS PHOTAR LUMINAR per NIKON"

-Diverse Adapter und Zubehörteile:

micro_crystal

[http://stores.ebay.de/micro-crystal-2013/Adapters-photo-microscope-
/i.html?fsub=938687919](http://stores.ebay.de/micro-crystal-2013/Adapters-photo-microscope-/i.html?fsub=938687919)

<http://stores.ebay.de/micro-crystal-2013>

fittings4you

Andreas Hohenester

Gersthofen, Deutschland

<http://stores.ebay.de/fittings4you-shop>

Thorlabs GmbH, Dachau/München, Lübeck Deutschland

<http://www.thorlabs.de/>

Testtarget:

Boraglas

<http://www.boraglas.de/index.php?pid=33&state=page&action=default>

CellFinder, S7 England Finder

<https://www.microscopeworld.com/p-1421-england-finder.aspx>

Zeiss Auflösungsstest-Objekt 3000

<https://www.micro->

[shop.zeiss.com/?l=de&p=de&f=a&i=10154_400000002300490000&sd=435298-9901-000](https://www.micro-shop.zeiss.com/?l=de&p=de&f=a&i=10154_400000002300490000&sd=435298-9901-000)

Kontakt, Haftungsausschluss:

Kurt Wirz
3414 Oberburg
Schweiz

Haftungsausschluss:

Der Autor übernimmt keinerlei Gewähr hinsichtlich der inhaltlichen Richtigkeit, Genauigkeit, Aktualität, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Informationen. Haftungsansprüche gegen den Autor wegen Schäden materieller oder immaterieller Art, welche aus dem Zugriff oder der Nutzung bzw. Nichtnutzung der veröffentlichten Informationen, durch Missbrauch der Verbindung oder durch technische Störungen entstanden sind, werden ausgeschlossen.

Alle Angebote sind unverbindlich. Der Autor behält es sich ausdrücklich vor, Teile der Seiten oder das gesamte Angebot ohne gesonderte Ankündigung zu verändern, zu ergänzen, zu löschen oder die Veröffentlichung zeitweise oder endgültig einzustellen.

Haftung für Links:

Verweise und Links auf Webseiten Dritter liegen ausserhalb unseres Verantwortungsbereichs. Es wird jegliche Verantwortung für solche Webseiten abgelehnt. Der Zugriff und die Nutzung solcher Webseiten erfolgen auf eigene Gefahr des Nutzers oder der Nutzerin.

Urheberrechte:

Die Urheber- und alle anderen Rechte an Inhalten, Text, Bildern, Fotos oder anderen Dateien auf der Website und diesem Dokument, gehören ausschliesslich Kurt Wirz oder den speziell genannten Rechtsinhabern. Für die Reproduktion jeglicher Elemente ist die schriftliche Zustimmung der Urheberrechtsträger im Voraus einzuholen.

Datenschutz:

Gestützt auf Artikel 13 der schweizerischen Bundesverfassung und die datenschutzrechtlichen Bestimmungen des Bundes (Datenschutzgesetz, DSG) hat jede Person Anspruch auf Schutz ihrer Privatsphäre sowie auf Schutz vor Missbrauch ihrer persönlichen Daten. Wir halten diese Bestimmungen ein. Persönliche Daten werden streng vertraulich behandelt und weder an Dritte verkauft noch weitergegeben. Mit unseren Hosting-Providern bemühen wir uns, die Datenbanken so gut wie möglich vor fremden Zugriffen, Verlusten, Missbrauch oder vor Fälschung zu schützen.

Oberburg, 9.04.2022