



Verzeichnung

von

B. Hönlänger und H. H. Nasse

Vorwort

„I found somebody say ,terrible moustache distortion’, but I don’t see any distortion at all”.

Wie man an dem obigen Zitat aus einer Foren-Diskussion sieht, kann man über den Verzeichnungsfehler von Objektiven recht unterschiedlicher Meinung sein. Manchen Fotografen sind die geraden Linien nicht so wichtig, oder in ihren Motiven gibt es kaum welche. Andere streben gerade hier nach Perfektion und treiben recht hohen Aufwand, um die geometrischen Bildfehler wenigstens nachträglich in der Bildbearbeitung zu beseitigen.

Wer das vermeiden möchte, sucht nach einem Objektiv, das schon ohne Nachbesserung praktisch fehlerfreie Bilder liefert. Und hier fängt das Problem mit den Zahlen an. Denn die absolute Perfektion gibt es nur in wenigen Objektivtypen. Die meisten haben kleine Fehler, und um zu entscheiden, ob die erträglich sind, muss man wissen, was die Zahlen in Datenblättern und Tests eigentlich bedeuten. Diese Ausgabe von Camera Lens News möchte Ihnen dabei etwas behilflich sein.

Und weil Verzeichnung vor allem bei Weitwinkelobjektiven von Bedeutung ist, gehen wir nebenbei auch noch auf andere Arten von Verzerrungen ein, damit Sie besser verstehen, warum die Bildgestaltung mit den kurzen Brennweiten gleichzeitig so schwierig aber auch so reizvoll sein kann.

Was verstehen wir unter „Verzeichnung“?

Die überwiegende Anzahl fotografischer Objektive erzeugt Bilder nach den Gesetzen der **Zentralperspektive**. Diese Art der Projektion vom dreidimensionalen Raum auf eine zweidimensionale Bildfläche nennt man auch **gnomonisch**. Das Wort ‚gnomon‘ ist griechisch (γνομόν = Schattenstab) und bezeichnet eine Art Sonnenuhr.

Denn wie bei einer Sonnenuhr entsteht ein Bildpunkt, indem man einen Punkt im Objektraum durch eine gerade Linie mit dem Projektionszentrum verbindet; dort wo diese Gerade die ebene Projektionsfläche schneidet, ist der Bildpunkt.

In der Malerei hat man diese zentralperspektivische Darstellung in der Zeit der Renaissance erfunden. Mit welchen handwerklichen Mitteln man sie streng angewandt hat, zeigt uns Albrecht Dürer:



Unterweisung in der Perspektive, Holzschnitt von Albrecht Dürer, um 1527

Das Projektionszentrum der Abbildung ist die Spitze des Stabs, über den Dürers Künstler die Reize der jungen Dame anpeilt. Die Projektionsfläche ist der zwischen den beiden aufgestellte Rahmen mit dem Gitternetz, mit dessen Hilfe der Künstler die perspektivisch richtigen Bildpunkte auf sein Zeichenblatt überträgt.

Das Projektionszentrum fotografischer Objektive ist ihre **Eintrittspupille**, also das von vorn gesehene Bild der Blende. Bei Panoramaaufnahmen muss man um die Eintrittspupille schwenken, damit Vordergrund- und Hintergrundobjekte nicht gegeneinander verschoben werden.

Oft wird dieser besondere Punkt auch als **Nodalpunkt** bezeichnet; in der optischen Fachsprache versteht man darunter aber etwas anderes. Die Eintrittspupille ist auch nichts sonderlich geheimnisvolles,

denn jeder kann sie ohne Hilfsmittel sehen und ihre ungefähre Lage abschätzen. Die Eintrittspupille ist aber nicht die körperliche Blende, sondern ihr virtuelles Bild – sie kann also auch außerhalb des Objektivs liegen. Das ist oft bei kurz gebauten Teleobjektiven der Fall.

Die gnomonische (zentralperspektivische) Abbildung hat die besondere Eigenschaft, dass alle geraden Linien des Objektraumes, egal wo sie sich befinden und egal wohin sie abgebildet werden, im Bild wieder eine gerade Linie sind. Erste Objektive, die streng so abbildeten, gab es seit den 1860er Jahren.

Unter Verzeichnung verstehen wir einen Abbildungsfehler, bei dessen Auftreten diese Eigenschaft nicht mehr genau erfüllt ist. **Ein Objektiv mit Verzeichnung bildet Linien, die nicht durch die Bildmitte gehen, leicht gekrümmt ab.**

Was sagt uns das Datenblatt des Objektivs?

Die Ursache der gekrümmten Bilder gerader Linien besteht darin, dass der Abbildungsmaßstab nicht im ganzen Bildfeld konstant ist. Oder noch anders ausgedrückt: bei einem Objektiv mit Verzeichnung ändert sich die Brennweite mit der Entfernung eines Bildpunktes von der optischen Achse.

Wenn der Leser erlaubt, dass ich ein wenig die Sprache der Mathematik verwende, dann versteht man ganz leicht, was die Zahlenwerte bedeuten, mit denen wir Verzeichnung beschreiben.

Zunächst die Abbildungsgleichung eines ideal gnomonisch abbildenden Objektivs:

$$u' = f' \cdot \tan W$$

W ist der objektseitige Feldwinkel, also der Winkel zwischen der optischen Achse und der Linie vom Objektpunkt zur Eintrittspupille, **u'** ist die Bildhöhe, also die Entfernung des Bildpunktes von der optischen Achse. In Worten heißt also die obige Gleichung: die Bildhöhe ist proportional zum Tangens des Feldwinkels, und die Brennweite **f'** ist die Proportionalitätskonstante.

Bei der Gelegenheit möchte ich anmerken, dass genau so die Brennweite von Objektiven definiert und gemessen wird: man misst den Winkel eines aus unendlicher Entfernung kommenden Lichtbüschels zur optischen Achse und die Höhe des zugehörigen Bildpunktes. Manchmal begegnet man auch Messungen, wo aus Entfernung und Abbildungsmaßstab im Nahbereich die Brennweite berechnet wird. Das Ergebnis weicht dann oft erheblich von den Herstellerangaben ab.

Das liegt aber nicht daran, dass der Hersteller maßlos geschummelt hat. Viele Objektive ändern ihre Brennweite mit der Fokussierung auf kurze Entfernung, und außerdem lassen solche Rechnungen weitere Objektivparameter wie Hauptebenenabstände unberücksichtigt. Aus diesem Grund hat z.B. ein lang gebautes Zoomobjektiv meist in der Nähe kleinere Objektfelder als eine Festbrennweite gleicher Brennweite.

Wenn die Brennweite im Bildfeld nicht konstant ist, kommt in der gnomonischen Abbildungsgleichung ein weiterer Faktor hinzu:

$$u' = f' \left(1 + \frac{V\%}{100} \right) \cdot \tan W$$

V ist das Maß für den Verzeichnungsfehler. Ist **V=0**, dann wird der Wert in der Klammer gleich 1, und alles ist wie beim idealen Objektiv.

Ist **V** eine **positive** Zahl, dann ist der Wert in der Klammer größer als 1. Die Bildhöhe **u'** ist dann größer als beim verzeichnungsfreien Objektiv gleicher Brennweite. Weil meist die Verzeichnung mit wachsender Bildhöhe zunimmt, wird deshalb ein Rechteck zu einer **kissenförmigen** Figur verzerrt. Wir werden allerdings später sehen, dass kissenförmige Verzerrungen auch bei negativen Werten von **V** auftreten können.

Ist **V** eine **negative** Zahl, dann ist der Wert in der Klammer kleiner als 1. Die Bildhöhe **u'** ist dann kleiner als beim verzeichnungsfreien Objektiv gleicher Brennweite. Ein Rechteck wird im Bild zu einer **tonnenförmigen** Figur verzerrt, es bekommt sozusagen einen Bauch.

In beiden hier unterschiedenen Fällen erfolgt die Verschiebung des Bildpunktes in radialer Richtung, also auf dem Radius des Bildkreises. Deshalb nennen wir den Parameter **V** auch **Radiale Verzeichnung**. In unseren Datenblättern zeigen wir die radiale Verzeichnung als Kurve in Abhängigkeit von der Bildhöhe.

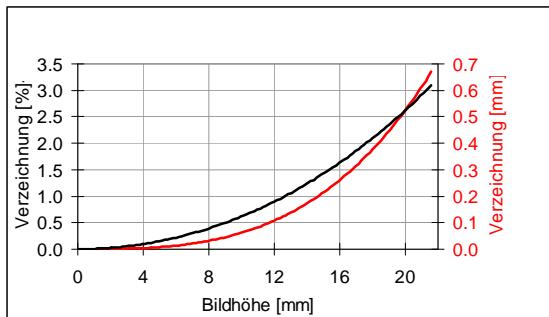
Diese Kurve enthält sämtliche Informationen über die geometrischen Eigenschaften des Objektivs. Für ihre richtige Deutung müssen wir sie aber noch besser verstehen. Denn woran erkennt unser Auge Verzeichnung recht empfindlich? Wenn wir konzentrische Kreise, etwa eine Zielscheibe, fotografieren, werden wir mäßige Verzeichnungen kaum erkennen, wir haben kein Gefühl für die richtige absolute Größe eines Kreises. Wir sehen aber recht gut, wenn gerade Linien krumm wiedergegeben werden, wir müssen also den Zusammenhang zwischen radialer Verzeichnung und der **Verbiegung gerader Linien** verstehen.

Radiale Verzeichnung und TV-Verzeichnung

Verzeichnungstypen

1. Kissenförmige Verzeichnung

Eine schon deutlich sichtbare kissenförmige Verzeichnung bei einem Objektiv für das Kleinbildformat wird durch folgende Kurve beschrieben:



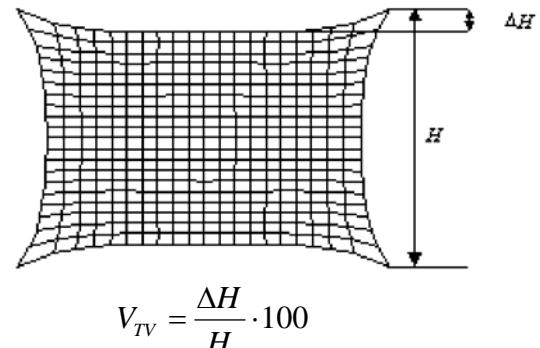
Die schwarze Kurve zeigt, wie der radiale Verzeichnungsfehler allmählich von Null in der Bildmitte auf 3% in der Bildecke zunimmt. Dort ist also die Brennweite um 3% größer als in der Bildmitte.

Die rote Kurve zeigt uns, wie groß die radiale Verschiebung der Bildpunkte absolut in Millimetern ist. Diese Zahlen sagen uns, dass deutlich sichtbare Verzeichnungen mehr als 10mal so groß sind wie der übliche Zerstreuungskreisdurchmesser. Verzeichnung ist also fast nie ein Baufehler oder Stoßschaden eines Objektivexemplars, kein Fall für den Service. Verzeichnung wird auch nicht durch abblenden verringert.

Man nimmt diese Kurve zur Kenntnis, merkt sich: „Das Objektiv hat 3% Verzeichnung“, und dann wundert man sich, dass ein Testbericht behauptet: „Das Objektiv hat 1.1% kissenförmige Verzeichnung.“ Wie passt das zusammen?

Nun, der Testbericht meint nicht die radiale Verzeichnung, sondern er spricht von der **TV-Verzeichnung**. Dabei misst man, wie stark das Bild einer geraden Linie am Bildrand (insbesondere am langen Bildrand eines rechteckigen Formats) durchgebogen ist. Diese Durchbiegung wird auf die gesamte Bildhöhe* (besser: Formathöhe) bezogen und als Prozentwert ausgedrückt.

Man muss also genau darauf achten, welcher Prozentwert eigentlich gemeint ist. Die Werte der TV-Verzeichnung sind immer kleiner als die von uns angegebene radiale Verzeichnung.

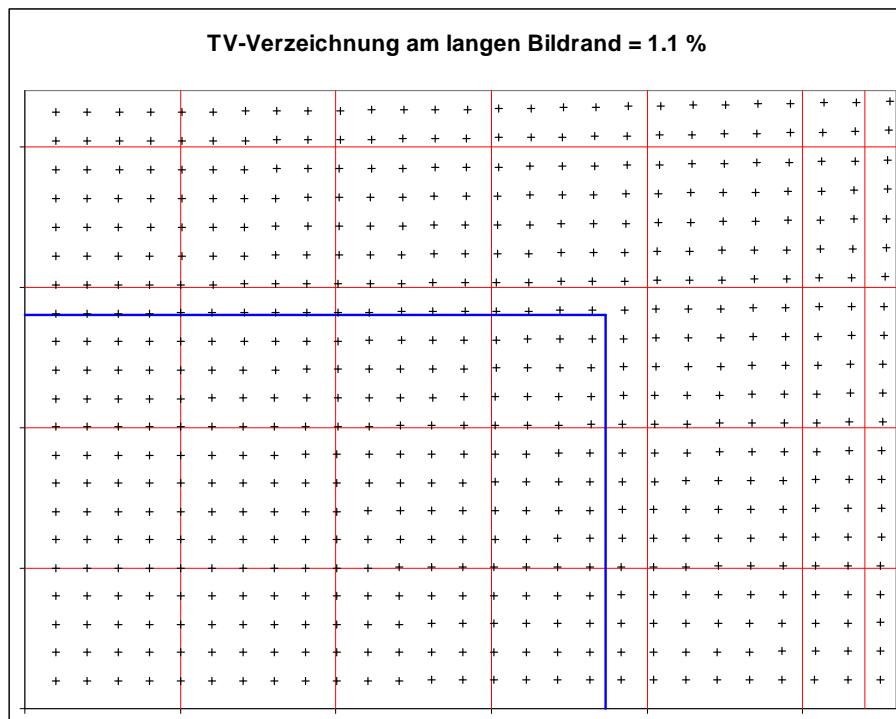


Manchmal wird auch die gesamte Höhendifferenz des Rechteckbildes zwischen Mitte und Rand gemessen und auf die Bildhöhe bezogen. Das ist dann doppelt soviel wie die obige Definition.

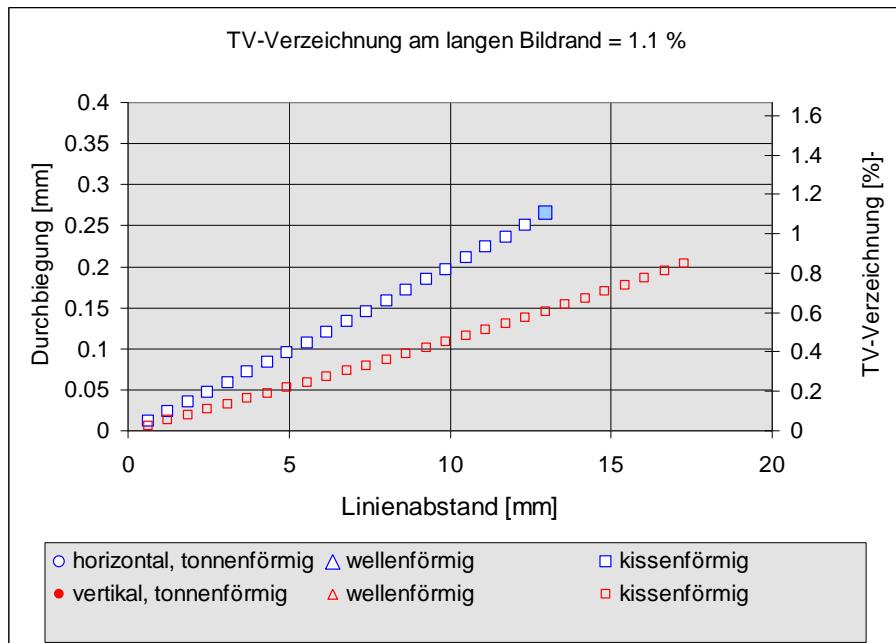
Um zu verstehen, wie es zu diesen recht unterschiedlichen Zahlen kommt, betrachten wir eine Linie am oberen Bildrand des Kleinbildformats. Ein Punkt in der Mitte dieser Linie ist 12mm von der Bildmitte entfernt. Dort hat das Objektiv etwa 1% radiale Verzeichnung. Das Bild dieser Linie ist also nicht nur verbogen, sondern als ganzes um 0.12 mm verschoben. Das bemerken wir aber nicht.

Wenn wir auf der Linie bis in die Ecke laufen, dann wächst die Bildhöhe von 12 auf 21.6 mm, und gemäß der obigen Kurve wächst dabei die radiale Verzeichnung auf 3.1%. Der Endpunkt der Linie ist also um $0.031 \times 21.6 = 0.67$ mm in radialer Richtung verschoben. Beim 24x36 Rechteck des Kleinbildformats ist aber die Diagonale um 56° gegen die senkrechte Richtung geneigt. Wenn man die radiale Verschiebung in einen waagerechten und einen senkrechten Anteil zerlegt, dann entfällt auf die senkrechte Richtung die Strecke $0.67 \times \text{Kosinus}(56^\circ) = 0.37$ mm. Die senkrechte Verschiebung der Bildpunkte ist also in der Linienmitte 0.12 mm und am Ende 0.37 mm. Die Verbiegung ΔH ist die Differenz, also 0.25 mm. Auf 24 mm Bildhöhe bezogen entspricht das knapp 1.1%.

* im Deutschen wird ‚Bildhöhe‘ in zwei Bedeutungen benutzt: Entfernung von der Mitte und Formathöhe



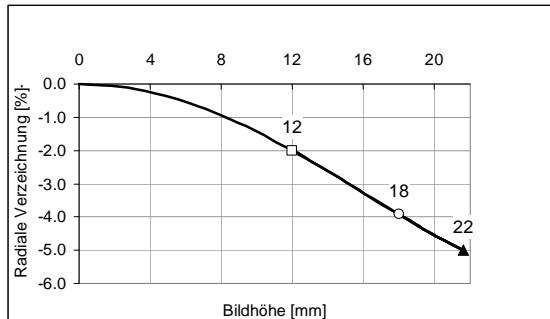
Diese Grafik zeigt eine simulierte Abbildung mit der oben spezifizierten kissenförmigen Verzeichnung. Die Kreuze sind die mit Verzeichnungsfehler abgebildeten Bildpunkte. Die dünnen roten Linien sind nicht verbogene Referenzlinien. Aus Symmetriegründen genügt es, nur ein Viertel des Bildes zu zeigen, die Bildmitte ist also in der linken unteren Ecke. Die blauen Linien zeigen den crop-Faktor 1.5x.



Die Durchbiegung nimmt bei diesem Verzeichnungsverlauf von der Mitte zum Rand monoton zu. Angaben zur TV-Verzeichnung beziehen sich immer auf eine Linie am langen Bildrand (blau gefülltes Symbol). Die Durchbiegung am kurzen Rand ist geringer, weil diese Linie nur die Bildhöhen von 18 bis 21.6 mm durchläuft.

2. Tonnenförmige Verzeichnung

Ein Objektiv mit deutlicher tonnenförmiger Verzeichnung gerader Linien hat eine dem Betrag nach zur Ecke hin zunehmende negative radiale Verzeichnung:



Minus 5% radiale Verzeichnung erreicht dieses Objektiv in der Bildecke, ein typischer Wert für viele Weitwinkel-bis-Tele Zooms bei kürzester Brennweite.

Die Verbiegung einer randnahen Linie an der langen Formatkante ist schnell ausgerechnet. Dabei bedenken wir wieder, dass wir die radiale Verschiebung in der Ecke mit dem Kosinus von $56^\circ = 0.55$ multiplizieren müssen, um nur ihren Beitrag zur Verschiebung in senkrechter Richtung zu berücksichtigen:

$$V_{TV} = (21.6 \times 0.05 \times 0.55 - 12 \times 0.01)/24$$

1.5 % TV-Verzeichnung lautet das Ergebnis.

Genauso können wir auch die Durchbiegung für eine randnahe Linie an der kurzen Formatkante ausrechnen, müssen aber nun die Neigung der Diagonalen gegen die waagerechte Richtung berücksichtigen. Sie beträgt nur 34° , der Kosinus davon ist 0.83

$$V_{TV} = (21.6 \times 0.05 \times 0.83 - 18 \times 0.04)/24$$

Mit 0.73% ist das Ergebnis erwartungsgemäß wieder kleiner.

Sie sehen also, liebe Leser, dass man sich im Wald der Prozentzahlen herrlich verlaufen kann. Und das will ich Ihnen jetzt demonstrieren, indem wir das Objektiv ein noch klein wenig schlechter machen:

Wir lassen jetzt die negative radiale Verzeichnung noch etwas weiter in den Keller fallen, bis auf -7% - also relativ gesehen 1.4x größer:



Auch solche Werte treten bei realen Objektiven auf, wenn sie außerhalb ihres normalen Anwendungsbereichs benutzt werden, z.B. ein Zoom in extremer Makro-Einstellung.

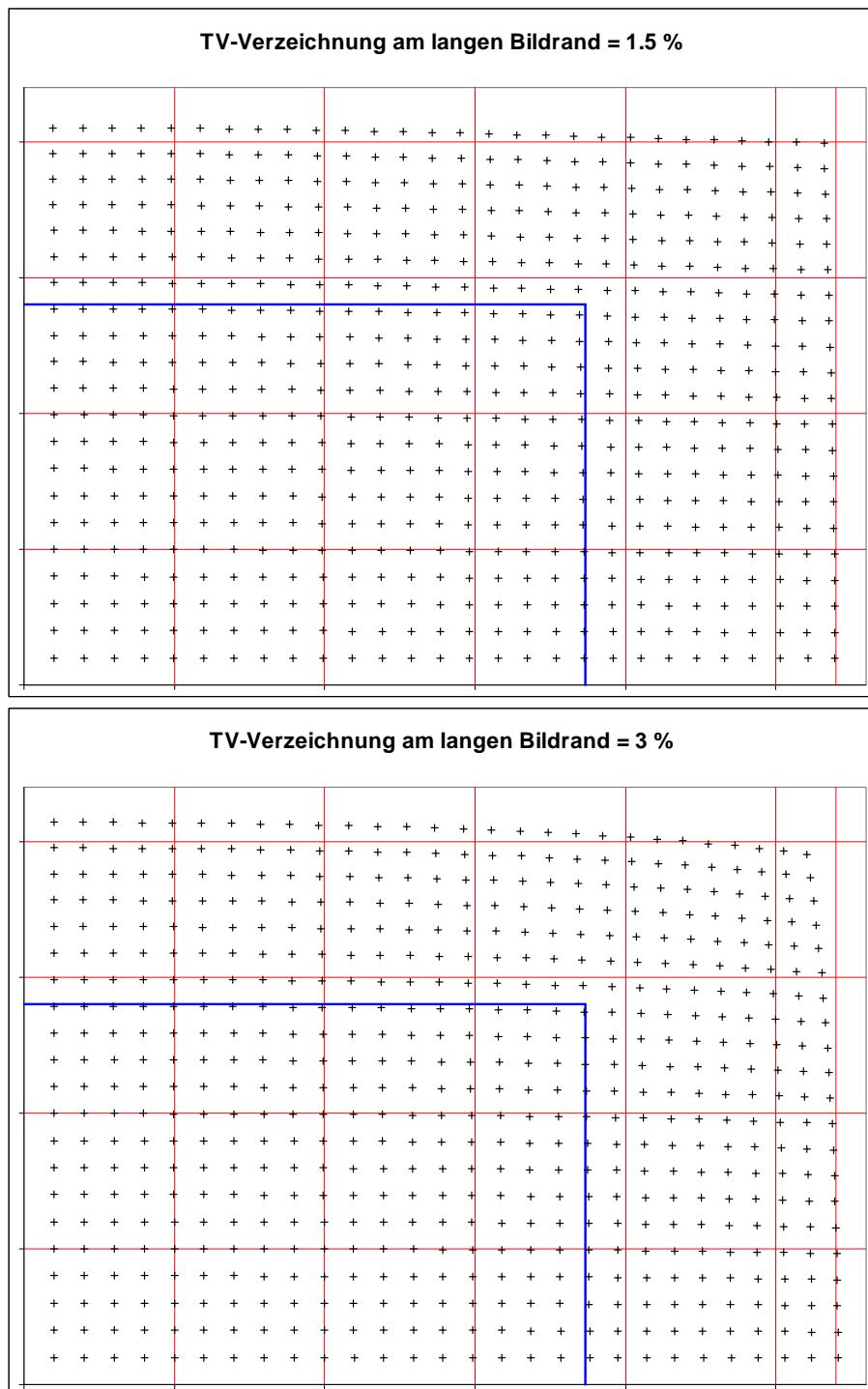
Wenn wir die gleiche Rechnung wie vorher für die lange Formatkante ausführen, erhalten wir:

$$V_{TV} = (21.6 \times 0.07 \times 0.55 - 12 \times 0.01)/24$$

Damit kommen wir für diese Linie auf rund 3% TV-Verzeichnung – ganz schön happig. Dabei hatten wir die maximale radiale Verzeichnung nur um 40% gesteigert, haben damit aber eine Verdopplung der TV-Verzeichnung erzielt.

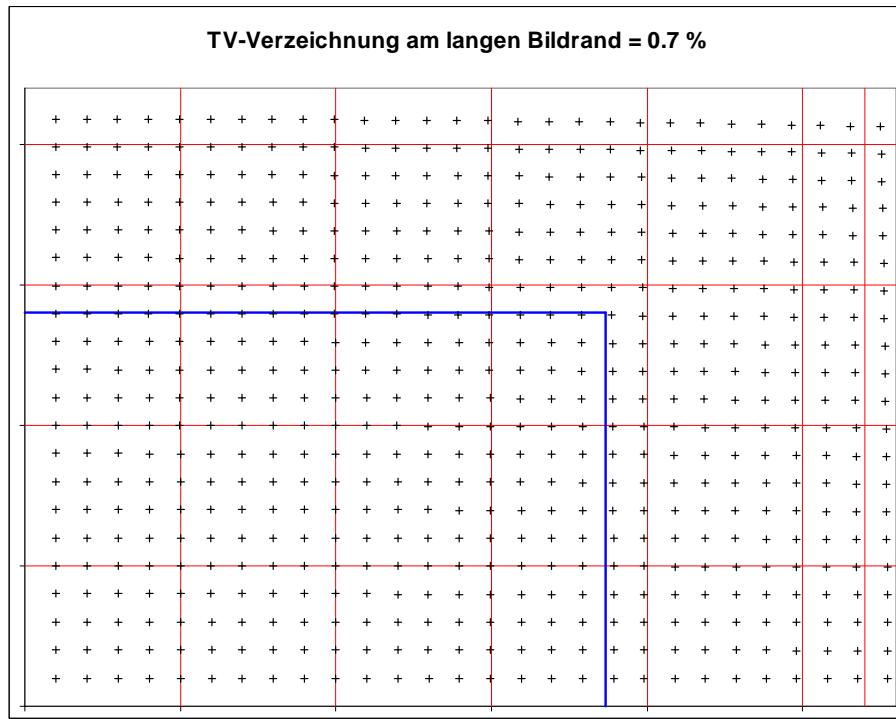
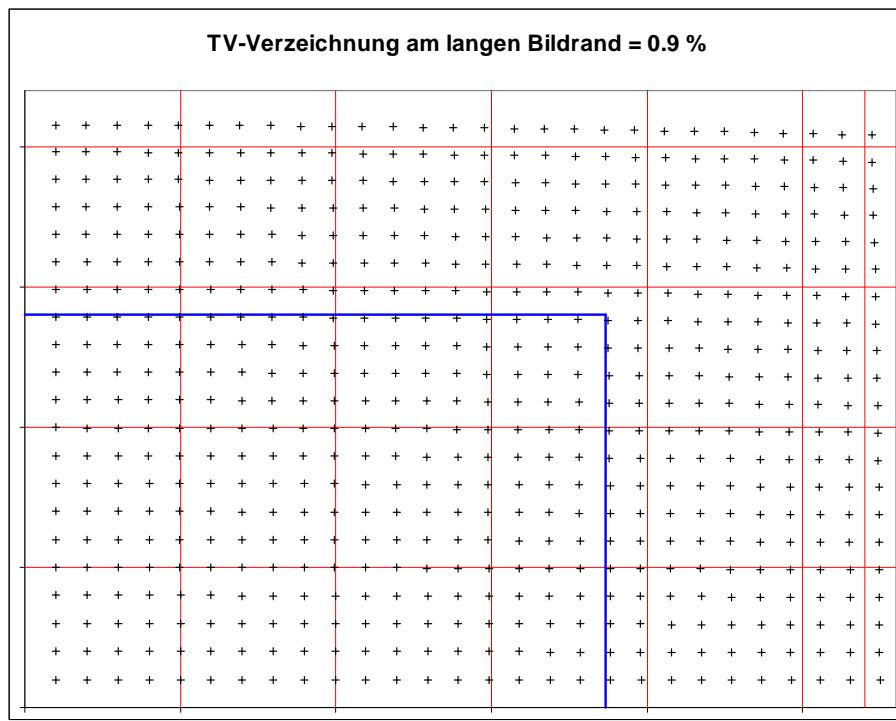
Die Ursache dafür besteht darin, dass wir in unserer Rechnung ja immer eine Differenz bilden, nämlich die Differenz zwischen der kleinsten und der größten Verschiebung infolge der Verzeichnung. Und bei unserem zweiten Objektiv ist nicht nur die Verzeichnung in der Ecke stärker geworden, sondern gleichzeitig bei 12 mm Bildhöhe kleiner geworden.

Was unser Auge vom Verzeichnungsfehler wahrnimmt, nämlich die Krümmung an sich gerader Linien, hängt also offenbar von der Änderung der radialen Verzeichnung entlang einer Linie ab. Und es scheint im Moment so, als ob die TV-Verzeichnung das bessere Maß sei. Ich zeige Ihnen aber im nächsten Abschnitt Gegenbeispiele – vorher wollen wir aber noch die Bildsimulationen der beiden Objektive sehen:

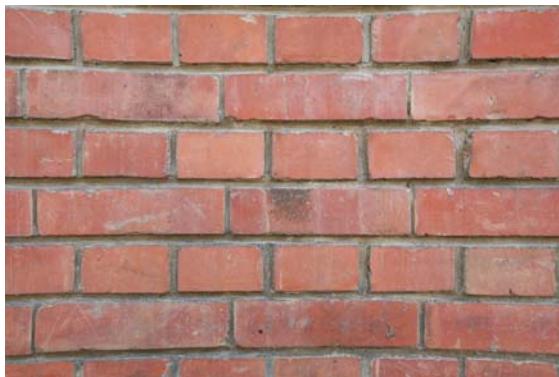


Simulierte Abbildung der auf der vorangegangenen Seite spezifizierten negativen radialen Verzeichnung. Starke tonnenförmige Verzeichnung im gesamten Bildfeld.

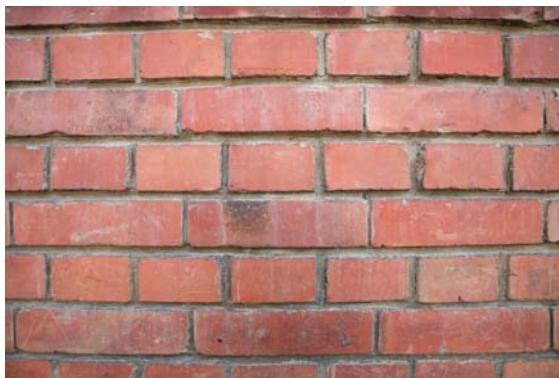
Die Verdopplung der TV-Verzeichnung im unteren Beispiel resultiert aus einem höheren Gradienten der radialen Verzeichnung zum Bildrand hin.



Wenn man hingegen die beiden Objektive im **APS-C Format** benutzt, dann ist das zweite mit nur 0.7% TV-Verzeichnung sogar geringfügig besser. Das liegt daran, dass seine radiale Verzeichnungskurve bei den kleineren Bildhöhen zunächst flacher verläuft.



Nicht jedes Motiv verrät die kissenförmige Verzeichnung dieses Zooms bei längster Brennweite (35mm) so stark wie hier. Senkrechte und waagerechte Linien in der Nähe der Bildränder erlauben dem Auge einen „Parallelvergleich“ und decken den Abbildungsfehler gnadenlos auf.



Dasselbe Zoomobjektiv wie beim obigen Foto zeigt bei seiner kürzesten Brennweite eine ausgeprägte tonnenförmige Verzeichnung. Dadurch entsteht die Illusion dass sich die Fläche dem Betrachter entgegenwölbt.



Auch wenn diese Eingangstüre schon recht alt ist, sind ihre einzelnen Elemente doch gerade, parallel oder rechtwinklig zueinander. Ein Weitwinkelzoom verzeichnet sie bei der Abbildung tonnenförmig.

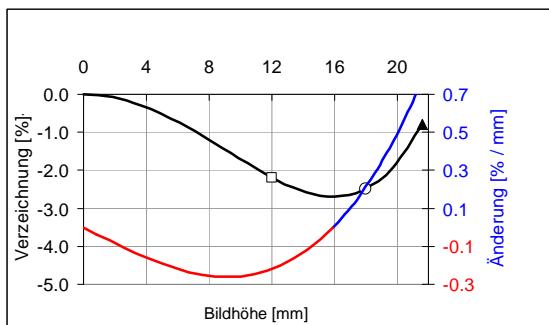


Im Bild der Fußbodenbretter links sehen Sie eine Verzeichnung, die eine eigenartige Mischung aus den beiden obigen Typen zu sein scheint. Lesen Sie auf den folgenden Seiten, wie das zustande kommt.

Das Bild war ursprünglich ein Ausschnitt 2164x256 von der rechten Hälfte des oberen Randes eines 4288x2848 großen Bildes. Es ist dann um den Faktor 8 überhöht worden, so ähnlich wie wir das auch in einigen Graphiken der folgenden Seiten tun werden.

3. Wellenförmige Verzeichnung

Leider ist die Berechnung der TV-Verzeichnung aus den radialen Daten nicht immer so schön einfach. Es gibt nämlich viele Objektive, wo die radiale Verzeichnung von der Mitte zur Ecke nicht monoton steigt oder fällt, sondern irgendwo dazwischen einen Extremwert hat. Er entsteht durch die mit wachsender Bildhöhe zunehmende Wirkung von Korrektionsmaßnahmen zur Begrenzung negativer Verzeichnung. Viele Retrofokus-Weitwinkel haben eine radiale Verzeichnungsfunktion, wie wir sie im folgenden Beispiel sehen:



Die radiale Verzeichnung dieses Objektivs ist überall negativ, sie erreicht bei 16mm Bildhöhe den stärksten Wert mit -2.6%, danach geht sie zur Ecke hin auf -0.8% zurück. Wenn wir bisher die einfache Regel im Kopf hatten „V ist positiv → kissenförmig, V ist negativ → tonnenförmig“, dann zeigt uns dieses Objektiv, dass diese einfache Regel nicht stimmt (leider stand das so auch auf alten ZEISS Datenblättern).

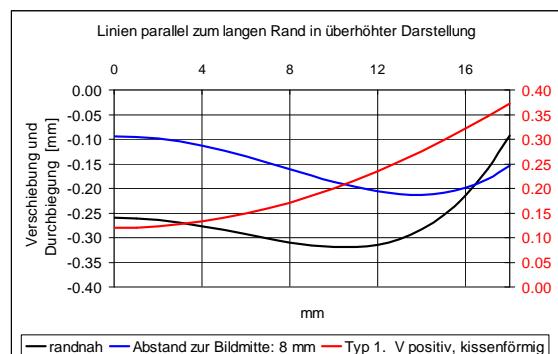
Wenn wir im Bild dieses Objektivs randparallele Linien betrachten, deren Punkte Bildhöhen zwischen 0 und 16 mm haben, dann sieht die Verzeichnungskurve genauso aus wie beim Typ 2. – wir sehen eine tonnenförmige Verbiegung.

Wenn wir aber Linien nahe an der kurzen Formatkante betrachten, deren kleinste Bildhöhen oberhalb von 16 mm liegen, dann sieht die Verzeichnungskurve auf diesem Teilstück aus wie beim Typ 1. – sie ist zwar negativ, aber die Werte steigen zur Ecke hin an. Wir sehen deshalb eine kissenförmige Verbiegung.

Die Eigenschaften „kissenförmig“ und „tonnenförmig“ hängen also gar nicht davon ab, ob die radiale Verzeichnung positiv oder negativ ist, sondern vom Vorzeichen der Ableitung der Verzeichnungsfunktion. Diese Änderung in % pro mm ist oben farbig eingezeichnet, rot dort wo sie negativ ist, und blau dort wo sie positiv ist.

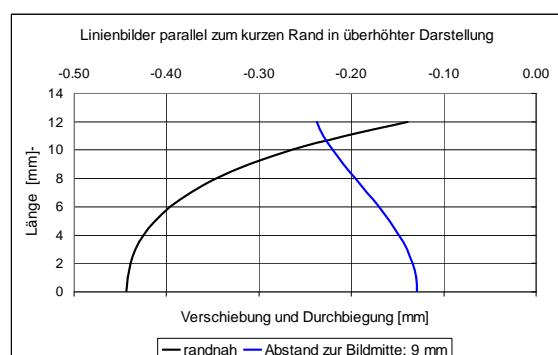
Bei vielen Linien, die parallel zur langen Formatkante sind und sich über die gesamte Bildbreite erstrecken, liegen einige Punkte im roten Bereich und andere im blauen Bereich. Deshalb muss es auf diesen Linien einen Wechsel zwischen tonnenförmigem und kissenförmigem Verzeichnungscharakter geben. Die Linie ist wellenförmig verzeichnet.

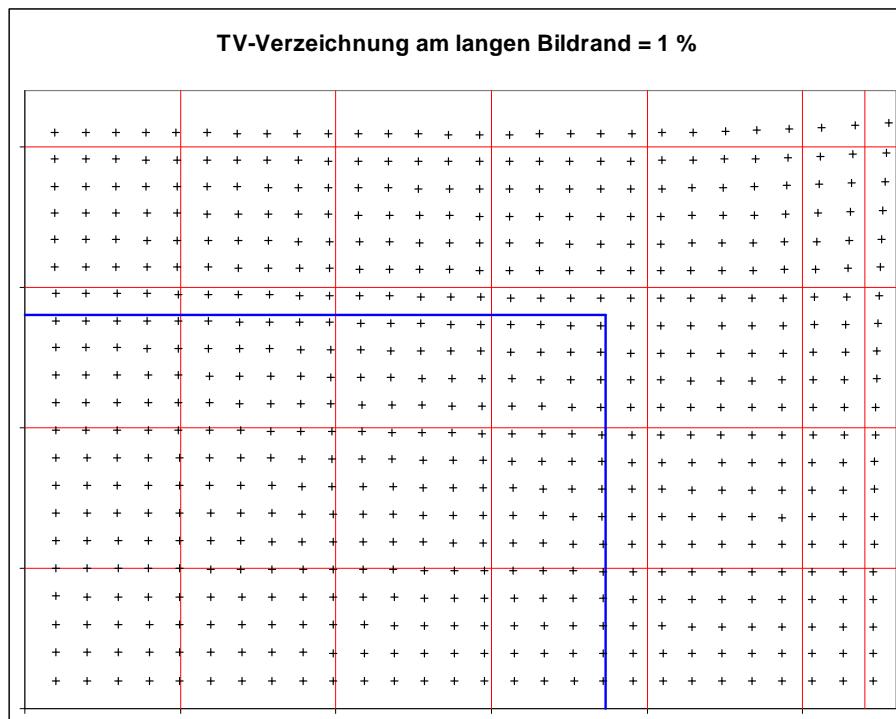
Wenn man das ganze Bild und auch Linien unterschiedlicher Länge betrachtet, dann kommen hier alle drei Typen der Verbiegung von Linien vor. Das zeigen die folgenden Bilder in stark überhöhter Darstellung:



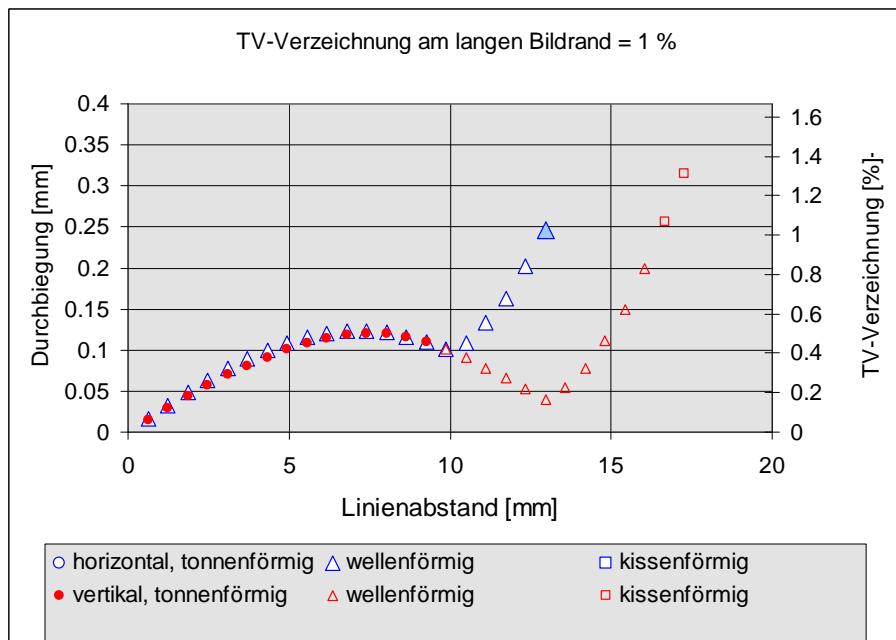
Zum Vergleich ist hier auch noch der rein kissenförmige Typ1 als rote Linie eingezeichnet. Ihre Durchbiegung ist zwar noch etwas größer als die der schwarzen Linie, aber vielleicht doch oft weniger auffällig, weil sie zum Rand hin nicht so steil ist.

Die folgenden zwei Linien parallel zur kurzen Formatkante haben rein tonnenförmigen und rein kissenförmigen Charakter:





Simulierte Abbildung mit der auf der vorangegangenen Seite spezifizierten negativen radialen Verzeichnung mit lokalem Extremwert. An den Rändern des Kleinbildformats dominiert der kissenförmige Charakter, im APS-C Format (blaue Linien) ist die Verzeichnung vorwiegend tonnenförmig.

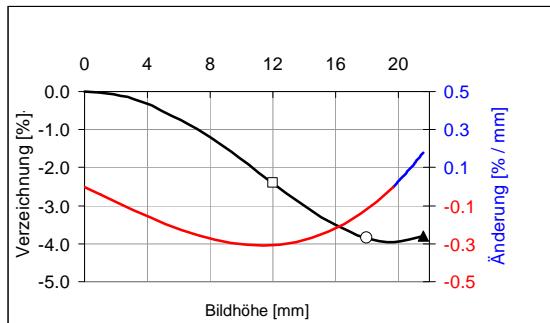


Für Linien mit unterschiedlichem Abstand von der Bildmitte ist die Entwicklung der Durchbiegung recht kompliziert: sie nimmt erst allmählich zu, dann wieder ab, um dann zum Rand hin dramatisch zuzunehmen. Die Form ändert sich dabei. Die Standard TV-Verzeichnung (blaues Dreieck) ist nicht die stärkste Durchbiegung.

Das obige Beispiel hat uns klar gezeigt, dass man Verzeichnung wie viele andere Eigenschaften von Objektiven nur sehr grob mit einer einzigen Zahl beschreiben kann. Der Maximalwert der radialen Verzeichnung kann irreführend sein; der Zahlenwert der TV-Verzeichnung ist manchmal etwas näher an der subjektiven Wahrnehmung – aber er sagt uns auch noch nicht genug über die Verzeichnung im gesamten Bild, und er sagt uns nicht, wie sich die Durchbiegung entlang einer Linie entwickelt.

Man kann mit dem obigen Objektiv Bilder ohne störende Verzeichnung machen, wenn man darauf achtet, dass markante Linien des Motivs in der Nähe der langen Formatkante nicht bis in die äußerste Ecke reichen, und wenn man kritische Linien nicht zu nahe an der kurzen Formatkante platziert.

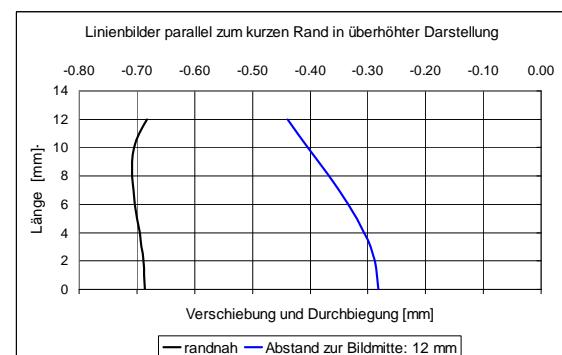
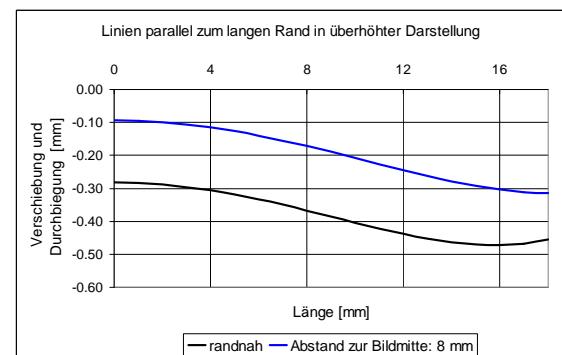
Wie begrenzt der Wert einer einzigen Zahl ist, sieht man noch deutlicher an dem nun folgenden Beispiel, wo die negative radiale Verzeichnung auf -4% gesteigert ist und trotzdem die Durchbiegung meist geringer ist:



Weil der Extremwert der radialen Verzeichnung jetzt nahe an der Bildecke liegt und weil die Werte nur über eine sehr kurze Strecke und viel weniger steil ansteigen, überwiegt in weiten Teilen des Bildes der tonnenförmige Charakter.

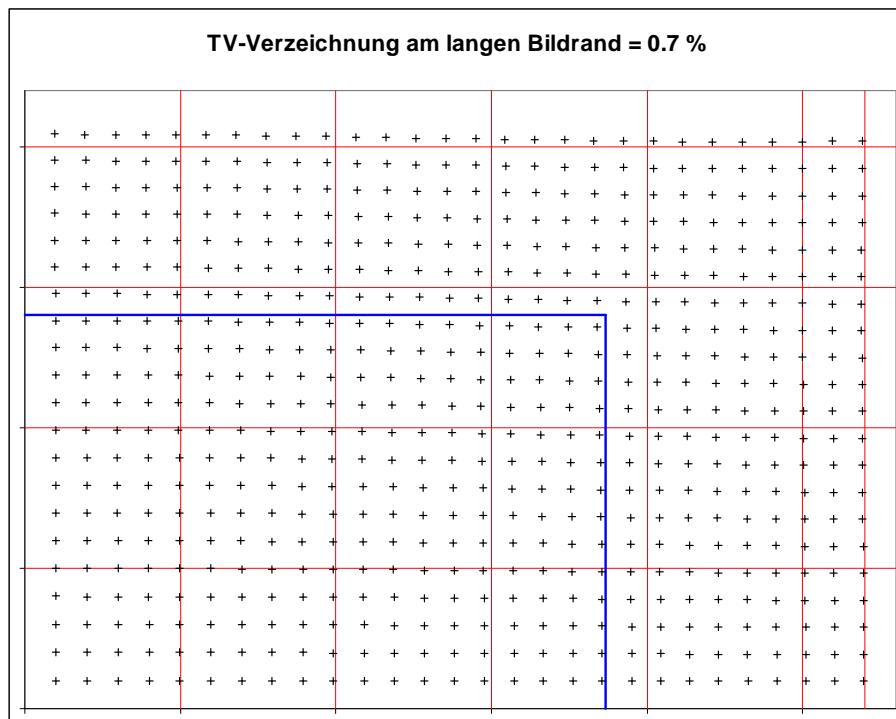
Für Linien an der kurzen Formatkante, deren Bildhöhen zwischen 18 und 21.6 mm liegen, ist die Verzeichnung zwar hoch. Daraus resultiert eine stärkere Verschiebung der ganzen Linie, die wir aber nicht bemerken. Wichtig ist, dass die **Änderung** der radialen Verzeichnung in diesem Bildhöhenbereich sehr klein ist. Denn das führt dazu, dass die Linien an diesem Bildrand praktisch gerade sind – trotz minus 4% Verzeichnung.

Das sieht man deutlich in der stark überhöhten Darstellung:

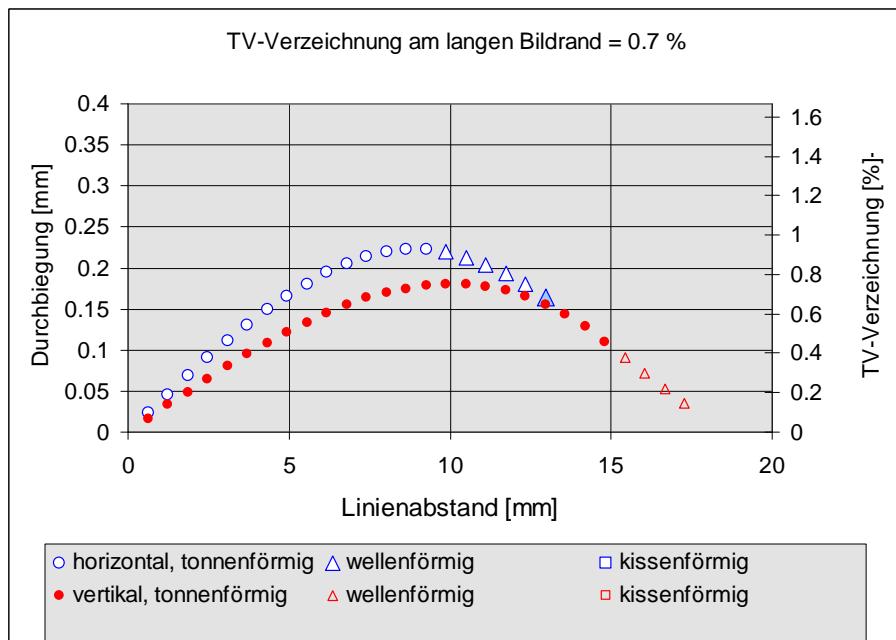


Gerade weil die Durchbiegung nah am Bildrand teils sehr klein ist oder zumindest nicht so steil verläuft wie im vorigen Beispiel, wird hier die auf den ersten Blick hohe Verzeichnung recht gut „versteckt“. Am Bildrand ist man ja oft besonders empfindlich, weil der gerade Rand dem Auge als Referenz, als Lineal dienen kann.

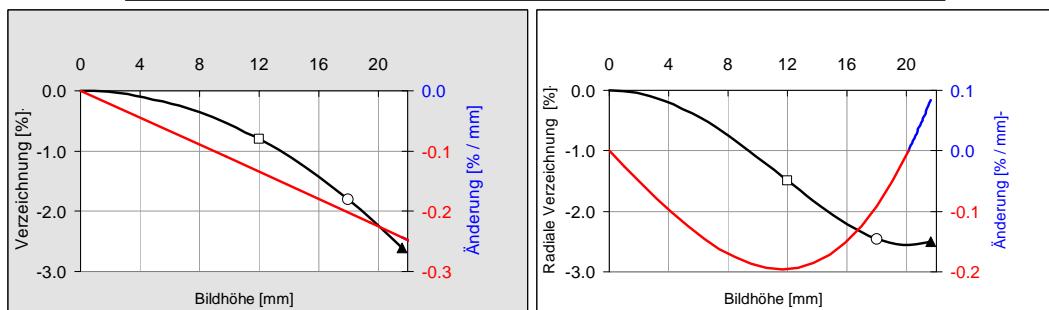
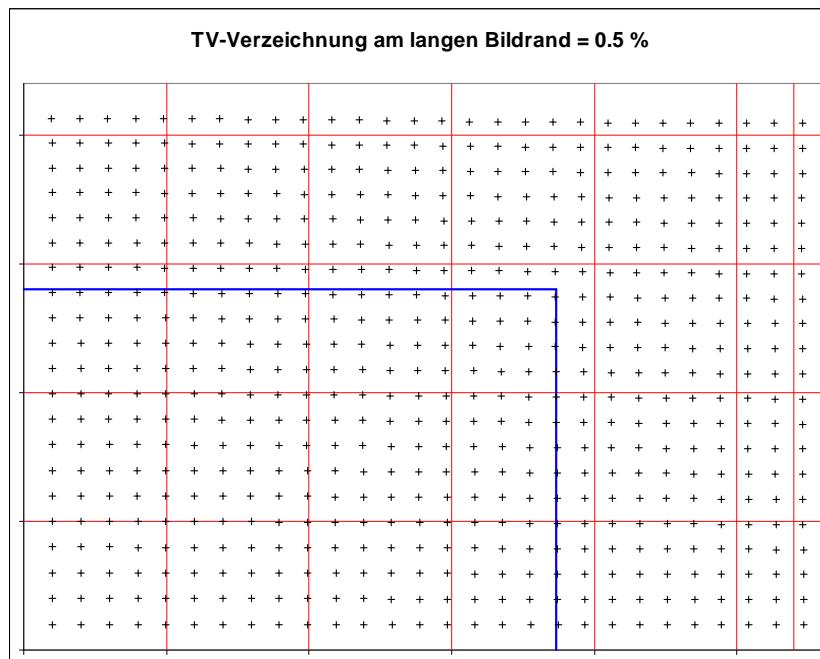
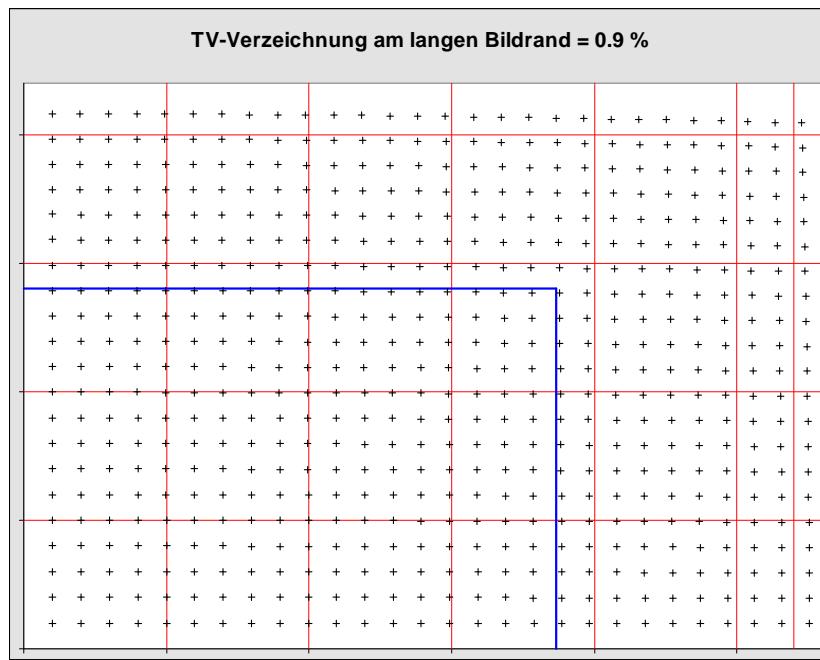
Der Wert der TV-Verzeichnung ist mittelmäßig, sie verschweigt uns allerdings, dass die Durchbiegung weiter innen etwas größer ist als am Rand des Bildes. Der Sinn der Messgröße TV-Verzeichnung besteht zwar darin, dass man durch Vergleich mit dem Formatrand dort besonders empfindlich ist für Verzeichnung. Aber was ist bei Beschnitt des Formats? Sie verschweigt uns außerdem die schöne Eigenschaft, dass der kurze Rand überhaupt keine sichtbare Verzeichnung aufweist (siehe folgende Seite).



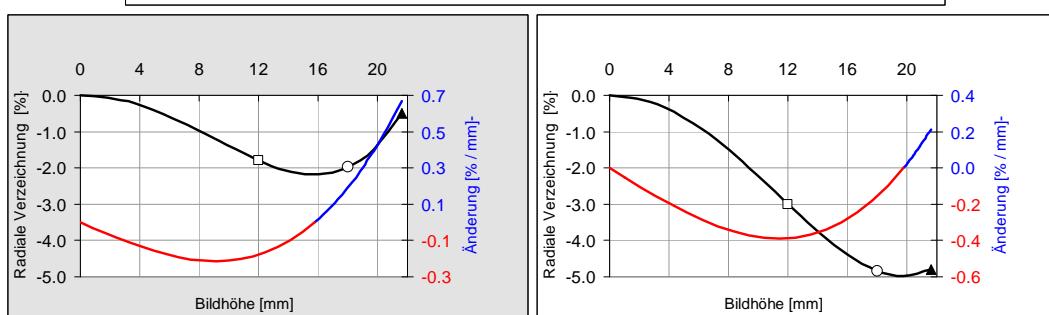
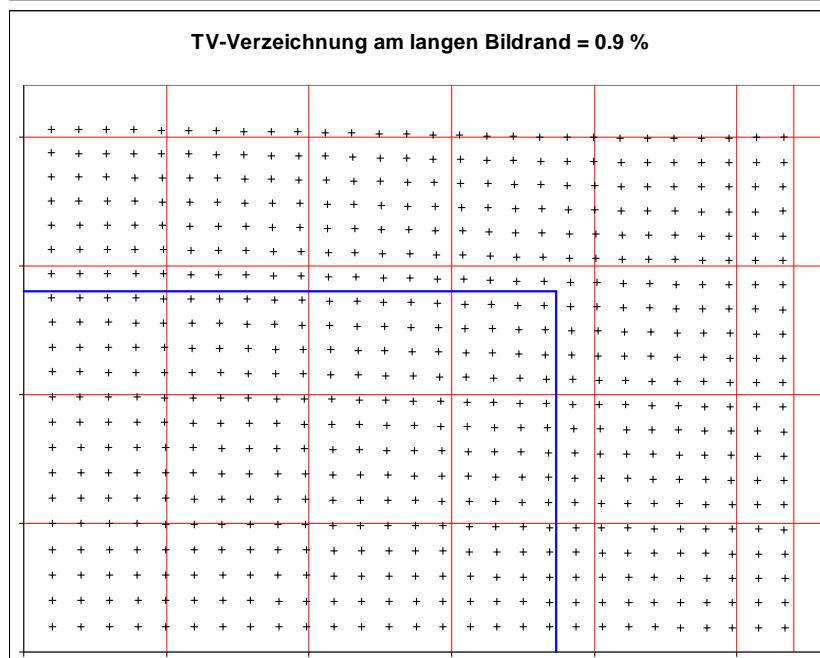
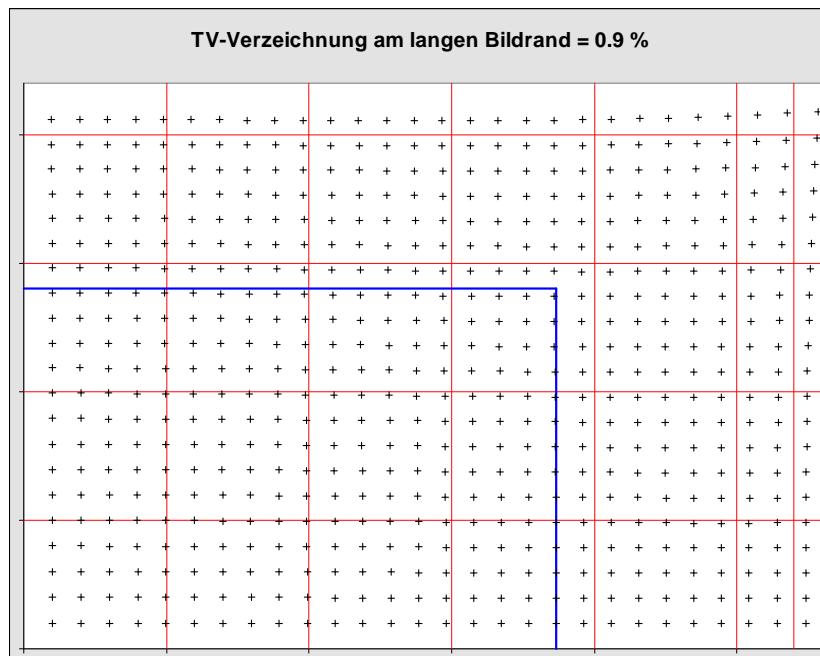
Simulierte Abbildung der auf der vorangegangenen Seite spezifizierten negativen radialen Verzeichnung. Am oberen Bildrand dominiert der tonnenförmige Charakter, der vertikale Bildrand rechts ist praktisch verzeichnungsfrei trotz eines hohen Wertes der radialen Verzeichnung.



Für Linien mit unterschiedlichem Abstand von der Bildmitte ist die Entwicklung der Durchbiegung einfacher als im vorigen Beispiel: sie nimmt allmählich zu und erreicht ein Maximum zwischen 9 und 10 mm Abstand von der Mitte, danach nimmt sie wieder ab und verschwindet am kurzen Rand fast völlig. Die Standard TV-Verzeichnung (blaues Dreieck) ist nicht die stärkste Durchbiegung.



Zwei weitere Beispiele, die den gleichen Maximalwert der radialen Verzeichnung haben:
Sie zeigen uns deutlich, dass die größere Steigung der Verzeichnungsfunktion stärkere
Linienkrümmung am Bildrand verursacht (links unten und oben).



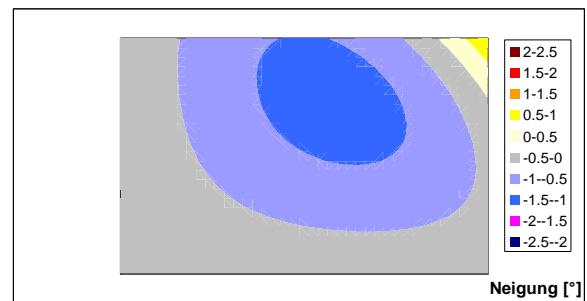
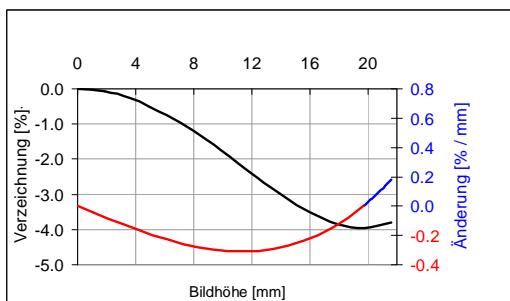
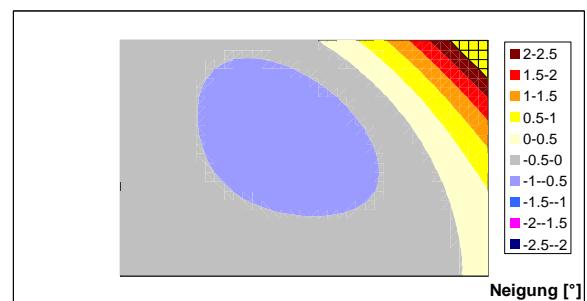
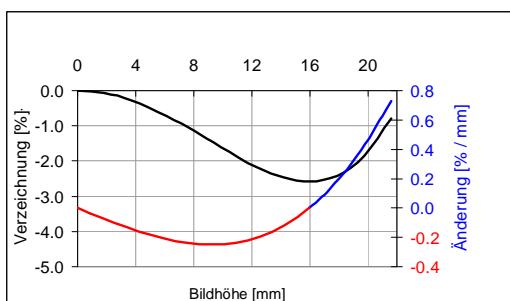
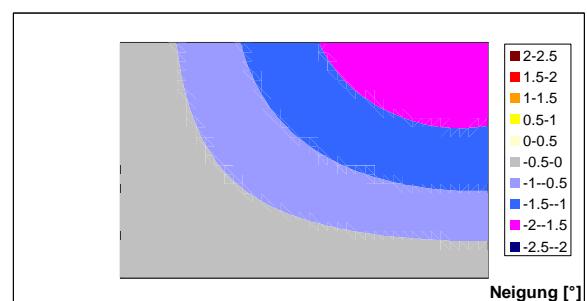
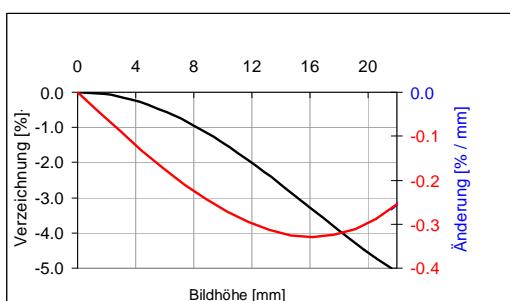
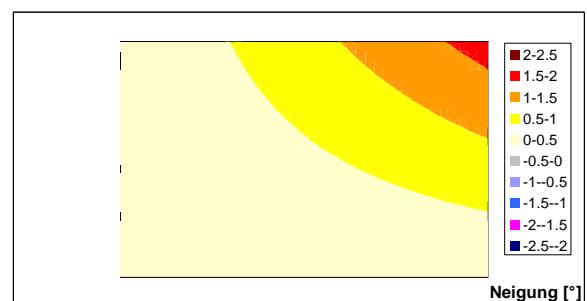
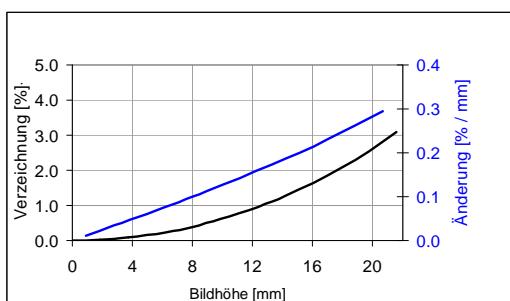
Diese zwei Beispiele und eines auf der vorigen Seite haben alle die **gleiche TV-Verzeichnung**. Wenn man aber die Wiedergabe an den Bildrändern vergleicht, findet man erhebliche Unterschiede.

Neigungswinkel

Wir haben an den Beispielen auf den vorigen Seiten gesehen, dass man Verzeichnung mit einer einzigen Zahl nicht vollständig beschreiben kann und dass auch die Kurven der radialen Verzeichnung nicht so leicht zu interpretieren sind.

Viel informativer wäre eine Art Landkarte des Verzeichnungsfehlers, die Sie auf dieser Seite für die vier wichtigsten Typen von Verzeichnung finden.

Auf dieser Landkarte ist der Neigungswinkel horizontaler Linien dargestellt. Ohne Verzeichnungsfehler wäre er auch im Bild überall genau 0° . Eine positive Neigung bedeutet, dass eine Linie von links nach rechts ansteigt (gelbe und rote Farben). Negative Neigung fällt von links nach rechts. Jede Farbe zeigt einen Winkelbereich von 0.5° . Wo sich die Farben schnell ändern, ändert sich auch der Neigungswinkel schnell – das Bild ist also dort stark gekrümmmt.



Objektivtypen

Die tieferen Ursachen des Verzeichnungsfehlers hängen zusammen mit der Verteilung der Brechkraft im Objektiv. Allerdings darf man darauf heute nur noch mit großer Vorsicht Prognosen der Verzeichnung begründen, weil viele moderne Korrektionsmittel zur Verfügung stehen, mit denen einfache Regeln außer Kraft gesetzt werden. Mit diesem Vorbehalt kann man folgende Typen unterscheiden:

Sehr geringe Verzeichnung haben alle **symmetrischen** Objektive, bei denen die Verteilung der Brechkräfte auf das Vorderglied vor der Blende und das Hinterglied hinter der Blende sehr ausgewogen ist. Der Idealfall wird repräsentiert von speziellen Repro-Objektiven für den Maßstab 1:1, sie sind perfekt symmetrisch, und der Strahlengang ist es auch. Dann tritt von Natur aus kein Verzeichnungsfehler auf.

Recht nah an diesem Ideal sind aber auch **nahezu symmetrisch** gebaute Weitwinkelobjektive wie das **Biogon**, die dank günstiger Baubedingungen spezieller Kameras eine ihrer kurzen Brennweite entsprechende kurze Schnittweite haben dürfen. Die Schnittweite, also der Abstand der letzten Linse von der Bildebene ist ein sehr empfindlicher Parameter. Deshalb waren die alten Biogon-Typen sogar noch etwas besser, denn sie mussten keine Rücksicht nehmen auf die Erfordernisse moderner TTL-Belichtungsmessung und durften deshalb noch kürzere Schnittweiten haben als ihre jüngeren Nachfolger. Trotzdem liegt auch bei diesen die TV-Verzeichnung so um die 0.2%, ist also in der bildmäßigen Fotografie völlig bedeutungslos.

Wenn man Bilder messtechnisch auswertet, dann wendet man auch auf so kleine Verzeichnungen rechnerische Korrekturen an. Man geht dann sogar soweit, dass man den Verzeichnungsfehler nicht mehr als rotationssymmetrisch annimmt. Die Verzeichnung der Biogene für die NASA wurde immer in mehreren Azimuten gemessen.

Ebenfalls sehr geringe Verzeichnung haben in der Regel **kurze Teleobjektive**, wie das **Planar 1.4/85**, vor allem wenn sie gar keine Tele-Konstruktionen sind, wie das **Tele-Tessar 4/85 ZM**.

Echte **Teleobjektive**, bei denen vorn positive Brechkräfte und hinten negative überwiegen, neigen zu kissenförmiger Verzeichnung.

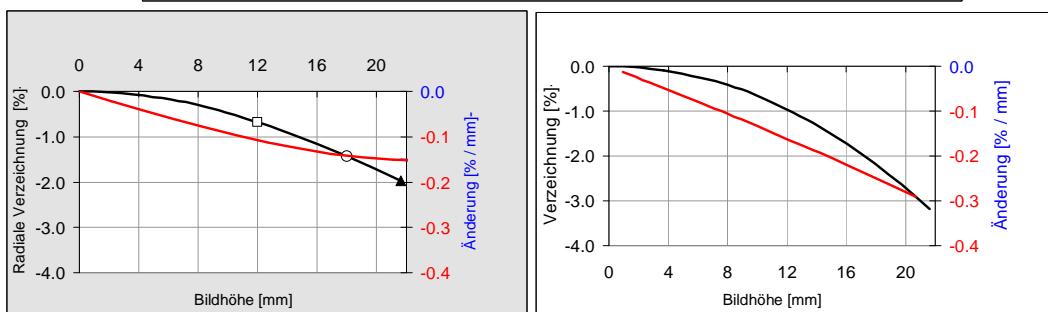
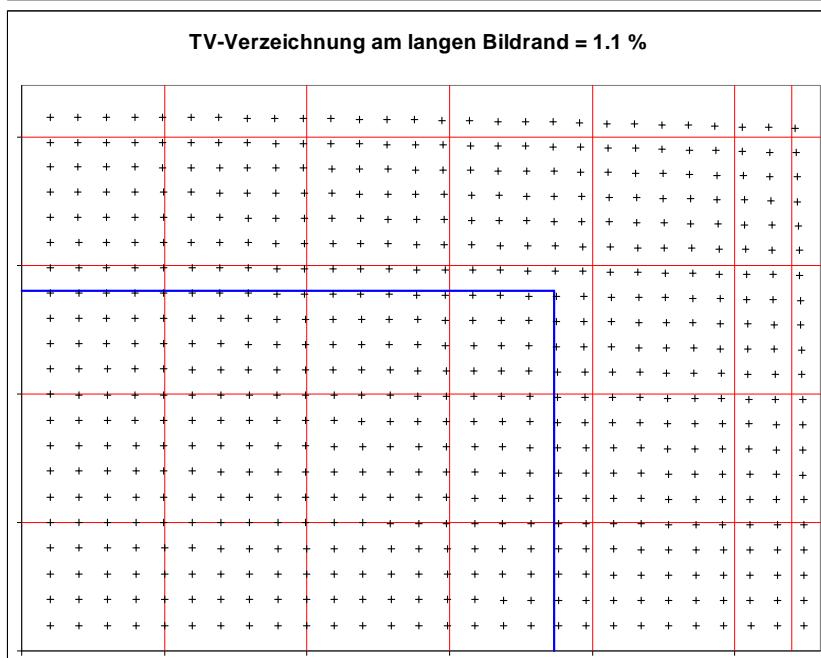
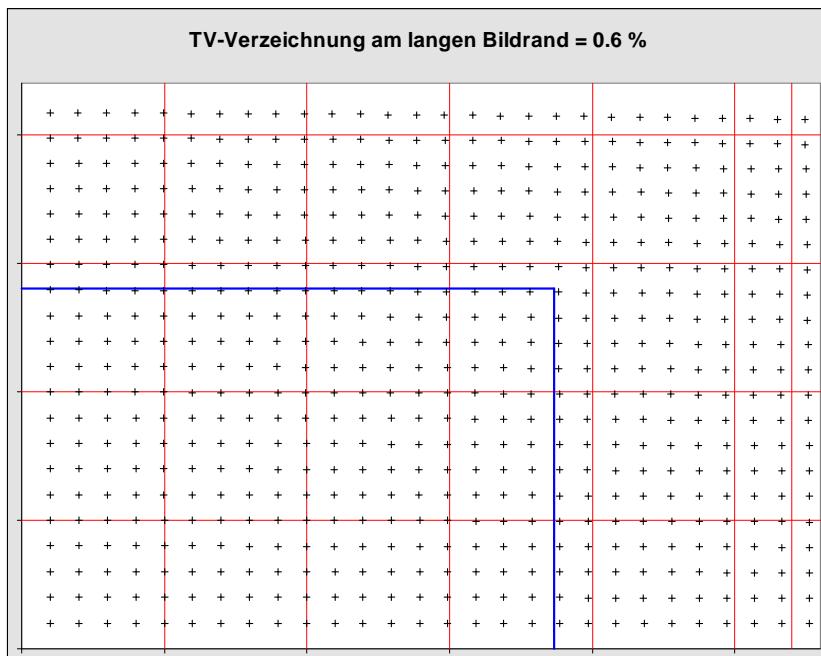
Umgekehrt zeigen alle **Retrofokus-Weitwinkelkonstruktionen**, deren stark verlängerte Schnittweite man ja für Spiegelreflexkameras braucht, tonnenförmige oder wellenförmige Verzeichnung.

Bei **Zoom-Objektiven** ist naturgemäß der Charakter der Verzeichnung mit der Brennweite variierend, weil sich beim zoomen die Verteilung der Brechkräfte ändert. Am kurzen Ende der Brennweitenskala besteht in der Regel die Neigung zu tonnen- oder wellenförmiger Verzeichnung, die dann zu längeren Brennweiten hin abnimmt oder in kissenförmige Verzeichnung übergeht. Wenn die radiale Verzeichnung beim zoomen das Vorzeichen wechselt, dann muss sie natürlich in bestimmten günstigen Brennweitenbereichen sehr klein werden. Dort ist das Zoom-Objektiv oft besser als eine vergleichbare Festbrennweite. Das erscheint vielleicht manchem paradox, denn man könnte doch die Festbrennweite genauso bauen wie das Zoom und lediglich die Bewegung der Zoomgruppen weglassen. Das will man aber nicht, denn das Zoomobjektiv ist viel größer als die Festbrennweite mit gleicher Brennweite und gleicher Öffnung.

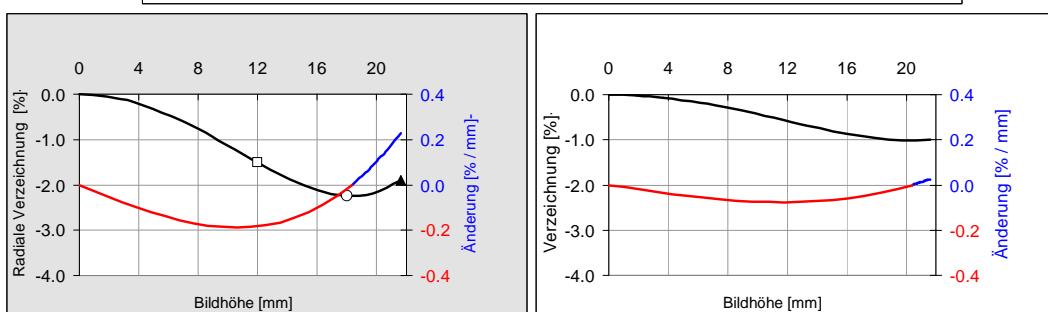
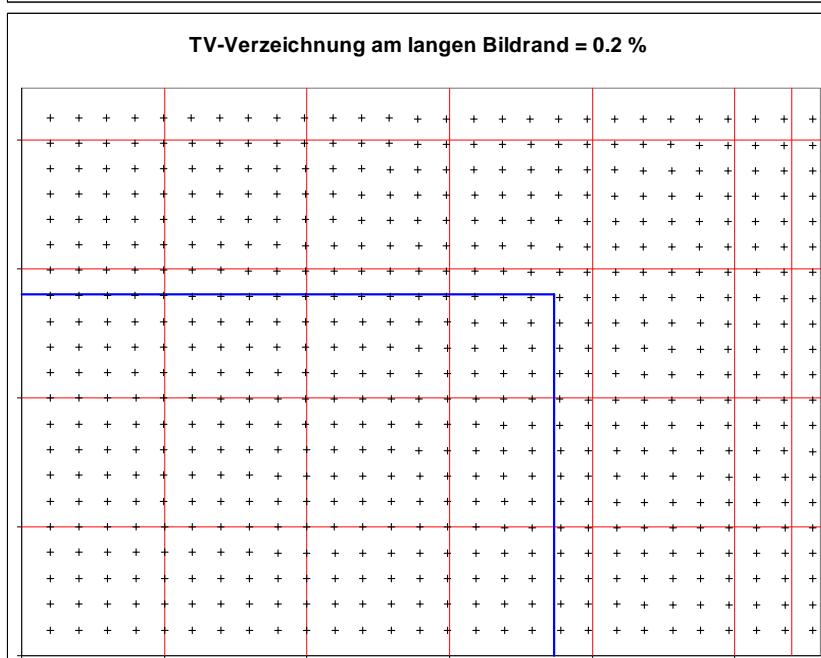
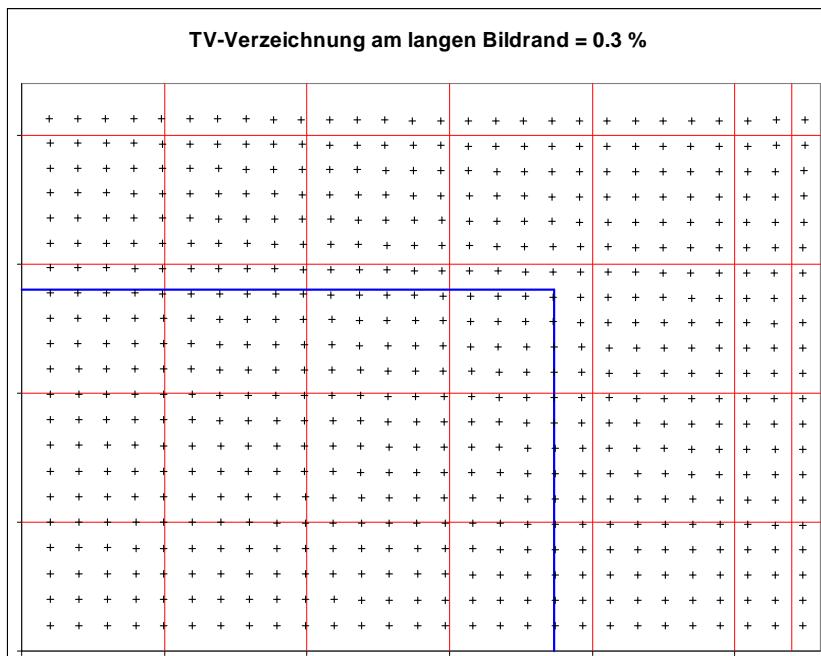
Verzeichnungskompromisse haben also immer auch etwas mit Baugröße und Gewicht eines Objektivs zu tun. Schon oft wurde eine an sich günstigere Rechnung verworfen, damit man beim Standard-Filtergewinde bleiben konnte.

Bei sehr **hoch geöffneten** Objektiven muss man meist eine etwas höhere Verzeichnung in Kauf nehmen als bei moderaterer Anfangsblende, wenn alle anderen Bedingungen gleich sind. Deshalb sind Makro-Objektive hinsichtlich der Bildgeometrie besser als lichtstarke Objektive gleicher Brennweite.

Nicht vergessen sollte man auch, dass Verzeichnung maßstabsabhängig ist und durch optische Vorsätze mit Brechkraft verändert wird.



Vergleich der Verzeichnung des hoch geöffneten Standardobjektivs **Planar 1.4/50 ZF/ZE/ZK** bei Aufnahmeentfernung **Unendlich** (oben und links unten) und bei **0.45 m**



Vergleich von **Distagon 2.8/25 ZF** (oben und links unten) and **Biogon 2.8/25 ZM** (unten und rechts unten). Beachten Sie bitte, wie klein sogar bei dem Retrofokus-Objektiv die wahrnehmbare Verzeichnung ist. Aber das Biogon ist trotzdem noch besser, denn beim Distagon ist in ca. 8-9 mm Abstand von der Bildmitte die TV-Verzeichnung 0.5%, während sie beim Biogon nirgends wesentlich über 0.2% ansteigt..

Nicht alle Verzerrungen sind Verzeichnung

Ob uns Verzeichnungsfehler in der fotografischen Praxis sehr stören, hängt natürlich vor allem auch vom Motiv ab. In der Natur und Landschaft gibt es wenig gerade Linien, da können wir etwas größere Fehler akzeptieren, weil wir sie gar nicht wahrnehmen. Das gleiche gilt für viele Porträtfotografien.

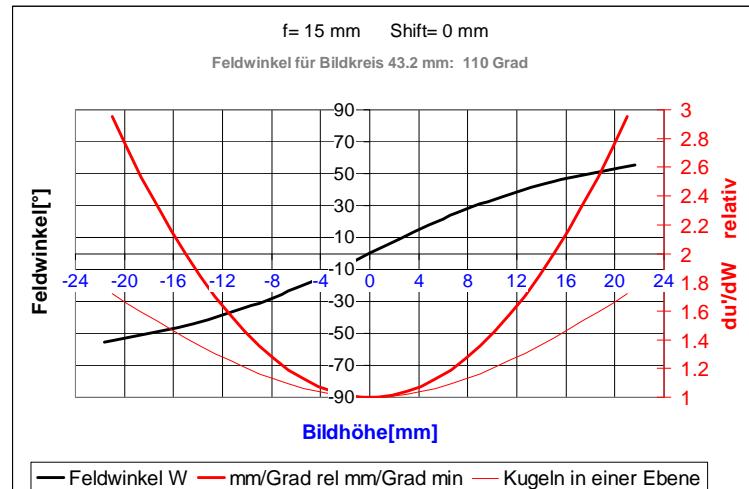
Je mehr aber die vom Menschen gemachte Welt im Bild vorkommt, desto wichtiger wird die Verzeichnungskorrektur. Denn die vom Menschen geschaffenen Objekte sind voller Geometrie. Bei den Themen Architektur und Reproduktion sind wir sehr kritisch gegenüber der Verzeichnung. Selbst wenn die geraden Linien nur Hintergrund und Nebensache sind, wie z.B. bei Fotos von Menschen in Räumen, mit Möbeln etc. dann stört uns starke Verzeichnung.

Andererseits ist es aber keineswegs so, dass mit einem völlig verzeichnungsfreien Objektiv alle gestalterischen Probleme der Weitwinkelfotografie gelöst sind. Man sieht z.B. oft Bilder von Menschengruppen, bei denen die ärmsten, die dicht am Bildrand stehen, so merkwürdig verzogen und schief aussehen und obendrein noch mit einem „Eierkopf“ geschmückt sind. Ist das ein neuer Fehler des Objektivs?

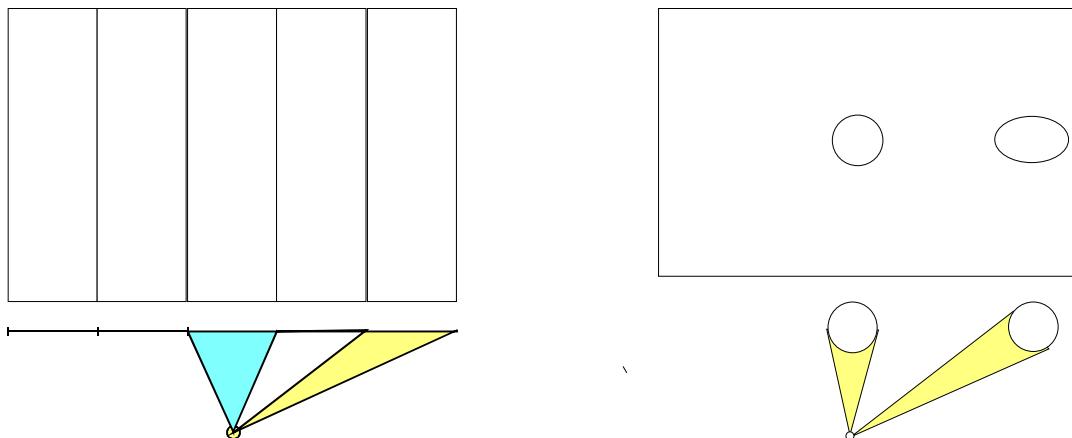


Das Brautpaar hat hier merkwürdig verzerrte Köpfe, während der Ballon in der Mitte eigentlich recht normal aussieht. Schuld war das 16mm-Objektiv aus sehr kurzer Distanz.

Nein, es ist ein Fehler des Fotografen, er hat mit einer zu kurzen Brennweite fotografiert. Es ist eine unabänderliche Eigenschaft der gnomonisch abbildenden Objektive, dass zum Rand hin gleiche Winkelintervalle auf eine größere Bildstrecke abgebildet werden. Die folgende Grafik zeigt das am Beispiel eines 15mm-Objektivs für das Kleinbildformat:



Grafische Darstellung der gnomonischen Abbildungsgleichung eines 15mm-Objektivs. Die schwarze Kurve zeigt den Feldwinkel in Abhängigkeit von der Bildhöhe; diese Kurve wird zu großen Bildhöhen hin flacher, was uns auch andeutet, dass man mit verzeichnungsfreien Objektiven niemals einen diagonalen Bildwinkel von 180° erreichen kann. Die rote Kurve hängt mit der Steigung der schwarzen zusammen; ihre Werte entstehen, indem man den Kehrwert der Steigung der schwarzen Kurve ausrechnet und auf seinen Wert in der Bildmitte bezieht. Die rote Kurve sagt uns also, um welchen Faktor das Bild des gleichen Feldwinkelintervalls am Rand größer ist als in der Mitte: beim 15er werden kugelförmige Objekte in der Ecke in radialer Richtung um den Faktor 3 verlängert. Das ist die Ursache der oben erwähnten „Eierköpfe“. Die dünne rote Kurve gilt für Kugeln in einer Ebene parallel zur Bildecke.



Bei einem ebenen, zweidimensionalen Objekt (linkes Bild), das z.B. lauter gleich breite Streifen oder auch Kreise enthält, tritt der Effekt nicht auf. Denn ein Streifen am Rand wird auch gleichzeitig vom Objektiv aus unter einem kleineren Winkel gesehen als in der Mitte. Diese Winkelabnahme passt genau zur Abbildungsgleichung, das verzeichnungsfreie Objektiv gibt das ebene Objekt hinsichtlich seiner Geometrie naturgetreu wieder.

Haben wir aber räumliche Objekte, z.B. Kugeln oder Köpfe (rechtes Bild), dann sieht die Sache anders aus. Die Kugeln werden aus allen Richtungen unter dem gleichen Winkel gesehen, und deshalb erzeugt gerade die Zunahme des Winkel-Maßstabs (rote Kurve der vorigen Seite) für die deutliche radiale Dehnung des Bildes.

Wenn man diesen Effekt vermeiden will, muss man entweder eine längere Brennweite nehmen, oder falls das nicht möglich ist, weil der Aufnahmehabstand nicht groß genug sein kann, ein Fisheye-Objektiv einsetzen. Dann wiederum muss man natürlich die stark gekrümmte Wiedergabe gerader Linien in Kauf nehmen. Beides gleichzeitig ist nicht möglich, weil man letzten Endes den dreidimensionalen Raum nicht völlig wirklichkeitstreuer in ein zweidimensionales Bild übertragen kann – irgendeine Eigenschaft muss verloren gehen.

Diese projektiven Verzerrungen sind eine der Herausforderungen der Gestaltung mit Weitwinkelobjektiven. Sie können die Bilder interessant machen oder auch ziemlich unakzeptabel sein, je nach Motiv und Geschmack.



Bei unserer schon bekannten Ziegelmauer stört die extreme Verzeichnung des Fisheye-Objektivs enorm.



Andere Motive kommen den Abbildungseigenschaften des Fisheye-Objektivs geradezu „entgegen“. Durch geschickte Wahl des Standpunkts stört seine Verzeichnung eigentlich kaum mehr.

Neben diesen Verzerrungen, die vor allem bei runden Objekten auffallen, gibt es natürlich noch die bekannten „stürzenden Linien“, also die konvergierenden Linien, wenn Bildebene und Objektebene nicht parallel zueinander sind. Sie sind ebenfalls keine Fehler des Objektivs.



Um das Gebäude von der Straße aus komplett aufnehmen zu können, musste die Kamera nach oben gekippt werden. Die Konvergenz der parallelen Gebäudekanten nach oben ist kein Abbildungsfehler des Objektivs.

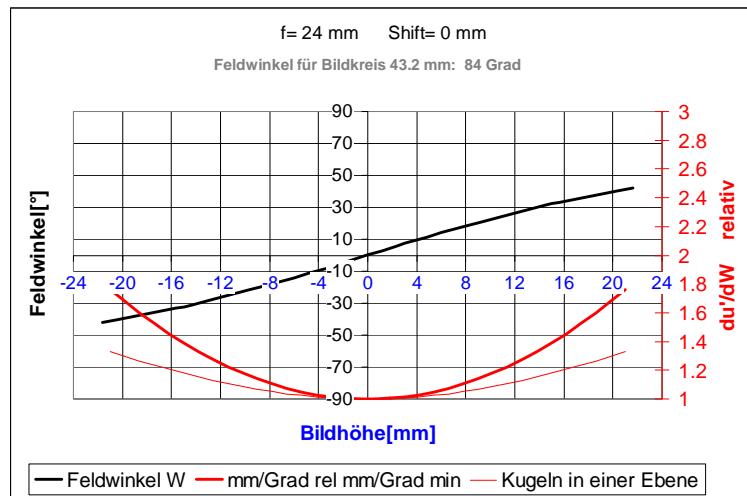
Konvergierende Parallelen empfinden wir vor allem als Fehler, wenn sie in vertikaler Richtung tun. Wir haben dann z.B. den Eindruck, dass ein Gebäude umfällt. Sehr stark stürzende Linien in vertikaler Richtung suggerieren dagegen Höhe. In horizontaler Richtung empfinden wir konvergierende Parallelen als ganz normal, das entspricht viel mehr unserer visuellen Erfahrung.



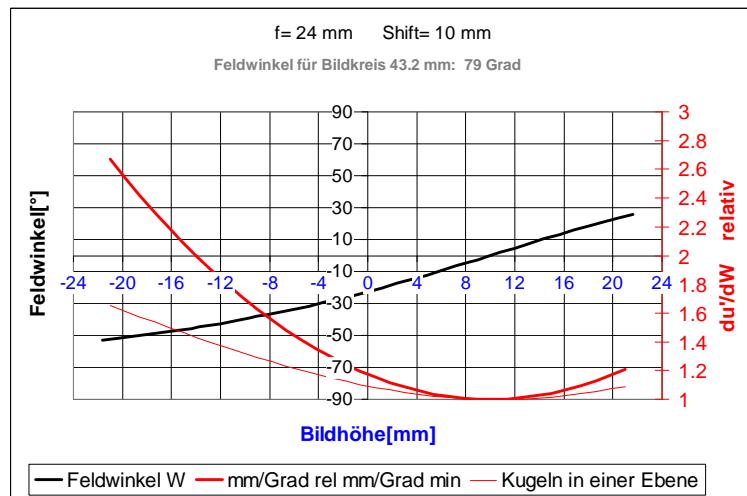
Niemand würde hier annehmen, dass das Gebäude nach rechts hin niedriger wird. Die parallelen Gebäudekanten konvergieren auf einen Fluchtpunkt rechts außerhalb des Bildes.



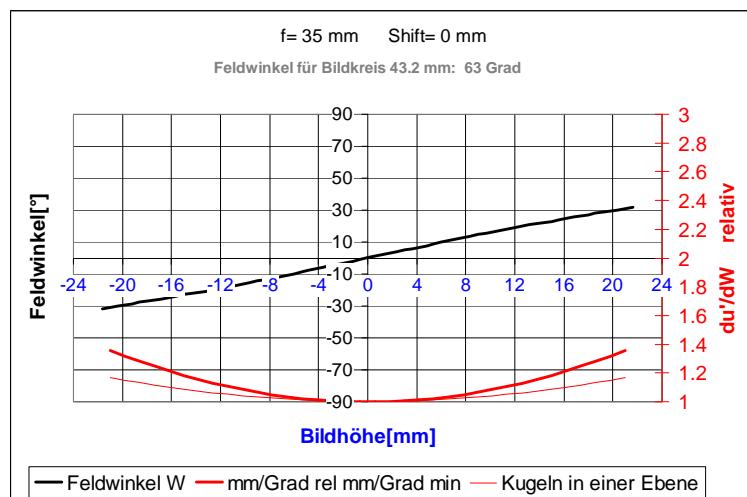
Hier stürzt, kippt und verbiegt sich alles in einem einzigen Bild. Die Standort- und Ausschnittswahl lässt die stark tonnenförmige Verzeichnung des Objektivs jedoch nicht allzu negativ auffallen.

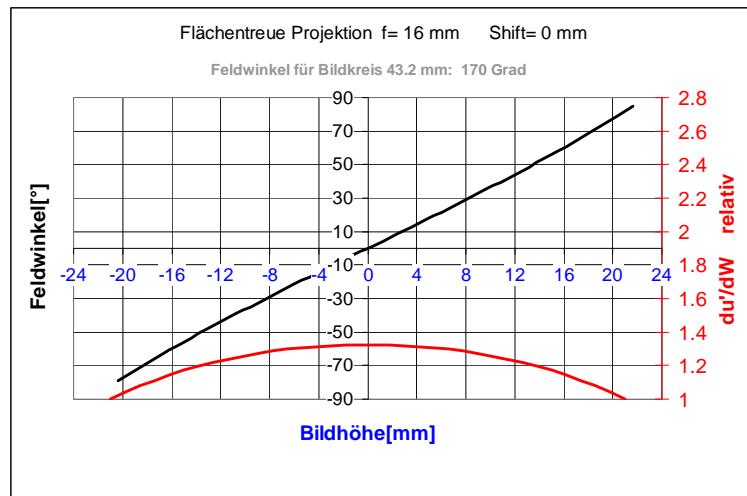


Abbildungsfunktion und Winkelmaßstab für ein 24mm-Objektiv. Die radiale Dehnung ist schon deutlich schwächer als bei 15 mm Brennweite.

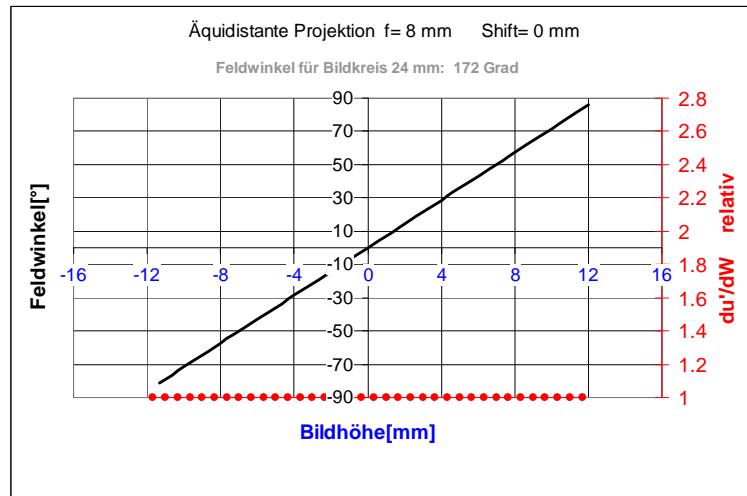


Wenn das 24mm-Objektiv einen vergrößerten Bildkreis hat und seine optische Achse um 10mm seitlich **verschoben** werden kann, dann wird der Winkelmaßstab in seitlicher Richtung unsymmetrisch, und auf einer Seite haben wir etwa die gleichen Verhältnisse wie beim 15er, auf der anderen Bildseite wie beim 35er (unten), wo die radiale Dehnung kaum noch sichtbar ist.





Abbildungsfunktion und Winkelmaßstab für ein Format-füllend abbildendes Fisheye-Objektiv, das annähernd der so genannten **flächentreuen Projektion** folgt. Hier nimmt der Winkelmaßstab zum Rand hin in einem Maße ab, wie er bei einem gnomonischen 35mm-Objektiv zunimmt. Die projektive Verzerrung von Kugeln ist also gering – dafür ist die radiale Verzeichnung in der Bildecke ca. - 90 %, alle nicht durch die Bildmitte verlaufenden Linien werden stark tonnenförmig gekrümmmt wiedergegeben.

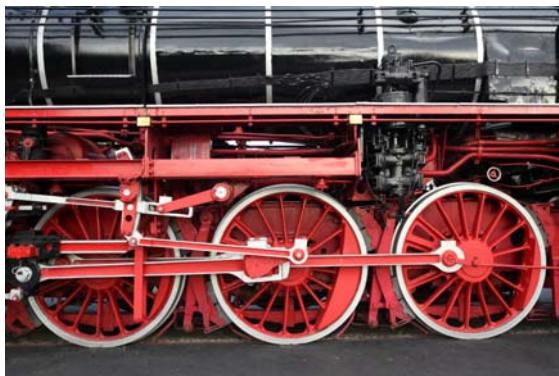


Abbildungsfunktion und Winkelmaßstab für ein Fisheye-Objektiv, das ein nicht Format-füllendes kreisförmiges Bild erzeugt. Seine Projektionsart nennt man „**äquidistant**“, weil die Bildstrecke eines Winkelintervalls überall im Bild gleich ist. Solche Objektive sind in erster Linie für wissenschaftliche Anwendungen entwickelt worden, wenn man in Bildern Winkel im Objektraum messen wollte.



Zwei Aufnahmen vom gleichen Kamerastandpunkt mit einem 24mm-Shiftobjektiv. Für das linke Bild war das Objektiv maximal nach links geshiftet, während es für das Bild auf der rechten Seite maximal nach rechts verschoben war. Um jeweils etwa den gleichen Bildausschnitt zu haben, wurde die Kamera entsprechend geschwenkt, dabei blieb das Stativ aber an derselben Stelle stehen.

Links ist deshalb der Winkel zwischen der Bildebene der Kamera und der Längsrichtung der Lokomotive größer als rechts. Das führt zu deutlich stärker konvergierenden Fluchtenlinien im linken Bild. Gleichzeitig wird im linken Bild das vordere Treibrad im Bereich der größten Feldwinkel des Objektivs abgebildet. Dadurch ist die radiale Dehnung dort schon recht groß. Das ist der Grund für die sehr unterschiedlichen Formen der Räder: während die hinteren durch die Schrägaussicht zu vertikalen Ellipsen werden, verformt die radiale Dehnung das vordere Rad zu einer horizontalen Ellipse. Diese Wiedergabe ist dann schon eine Frage des Geschmacks.



Wieder zwei Aufnahmen mit dem 24mm-Shiftobjektiv vom gleichen Kamerastandpunkt. Links ist das Objektiv unverstellt und die Kamera parallel zur Seitenfläche der Lokomotive ausgerichtet. Rechts ist das Objektiv nach unten geshiftet und die Kamera nach oben geschwenkt, um wieder einen ähnlichen Bildausschnitt zu sehen. Drei Phänomene fallen uns auf: 1) der Bildwinkel ist etwas kleiner geworden, 2) durch die Schrägaussicht und die nach unten zunehmende radiale Dehnung werden die Räder zu vertikalen Ellipsen verzerrt und die Radachsen sind nicht genau in der Mitte, 3) wir sehen stürzende Linien in den hellen Streifen am Kessel und in der Neigung der Ellipsenachsen der beiden äußeren Räder. Niemand würde glauben, dass diese Lokomotive fahren könnte.

Softwarekorrektur

Sie haben jetzt mehrmals gelesen, dass man Verzeichnung nicht durch eine einzige Zahl vollständig beschreiben kann, sondern eine ganze Kurve betrachten muss oder eine Art Landkarte. Das klingt nach ganz vielen Zahlen.

Zum Glück ist es aber so schlimm auch wieder nicht, denn die Verzeichnungsfehler der meisten Objektive lassen sich nämlich durch nur zwei Zahlen mit ausreichender Genauigkeit beschreiben.

Alle Verzeichnungsfunktionen, die wir weiter oben betrachtet haben, gehorchen einer recht einfachen Gleichung:

$$V = a \cdot u'^2 + b \cdot u'^4$$

In den einfachsten Fällen ist $b=0$ und dann steigt die Verzeichnung proportional zum Quadrat der Bildhöhe. Ist b deutlich verschieden von Null und haben a und b unterschiedliche Vorzeichen, dann liegt eine wellenförmige Verzeichnung vor. Für den absoluten radialen Fehler der Bildpunktlage gilt:

$$\Delta r = a \cdot u'^3 + b \cdot u'^5$$

Die beiden konstanten Zahlen a und b in diesen Gleichungen sagen uns also alles über die Verzeichnung eines Objektivs – bei einer bestimmten Aufnahmeentfernung. Wenn Entfernung und Maßstab sich ändern, ändern sich auch a und b .

Wenn man die radiale Verzeichnungskurve kennt, z.B. aus einem Datenblatt des Herstellers, dann kann man a und b aus zwei Punkten auf dieser Kurve ausrechnen.

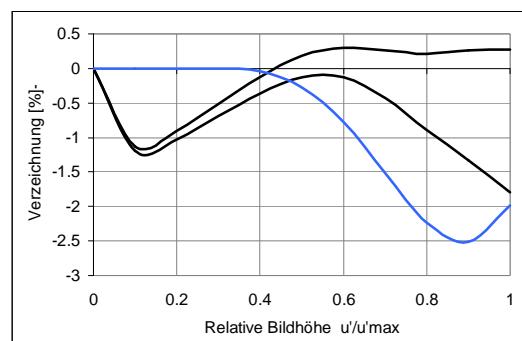
Man kann a und b aber auch aus Bilddaten berechnen: drei Punkte auf einer randnahen Linie genügen ebenfalls. Meist benutzt man allerdings eine größere Anzahl von Bildpunkten, um kleine Fehler bei der Ermittlung der Bildkoordinaten auszugleichen. Und man muss natürlich voraussetzen, dass die Linie im Objekt absolut gerade ist.

Kennt man a und b , dann kennt man also den Verzeichnungsfehler an jeder Stelle im Bild, und dann kann man ihn rückgängig machen, wenn das Bild als digitaler Datensatz vorliegt.

Die Umwandlung der Bildgröße ist ja jedem vertraut, der mit digitalen Bildern umgeht und sie z.B. an die geplante Druckgröße anpassen will. Dabei werden sehr genau arbeitende Interpolationsalgorithmen angewandt. Verzeichnungskorrektur arbeitet so ähnlich, nur dass dabei im Bild variable Größen-Änderungen vorgenommen werden.

Die Korrektur mit Hilfe der radialen Verzeichnungsfunktion nimmt natürlich zusätzlich an, dass die Fehler rotations-symmetrisch sind. In Wirklichkeit haben Objektive aber außer radialen Fehlern auch tangentiale, und der radiale Fehler ist auf einem Kreis im Bild nicht konstant. Diese Effekte sind aber sehr klein und nur für messtechnische Anwendungen von Bedeutung (Photogrammetrie). In der bildmäßigen Fotografie kann man sie vernachlässigen.

Es gibt natürlich auch Verzeichnungsfunktionen, die sich nicht durch solche einfachen Gleichungen darstellen lassen, so dass viele Korrekturverfahren daran scheitern:



Verzeichnung von zwei Objektiven für Kameramodule in Mobiltelefonen; die schwarzen Kurven gelten für unterschiedliche Aufnahmeentfernung. Objektive mit sehr stark asphärischen Flächen haben recht komplizierte Verzeichnungsfunktionen, die sich durch die obige Näherung 5ter Ordnung nicht darstellen lassen.

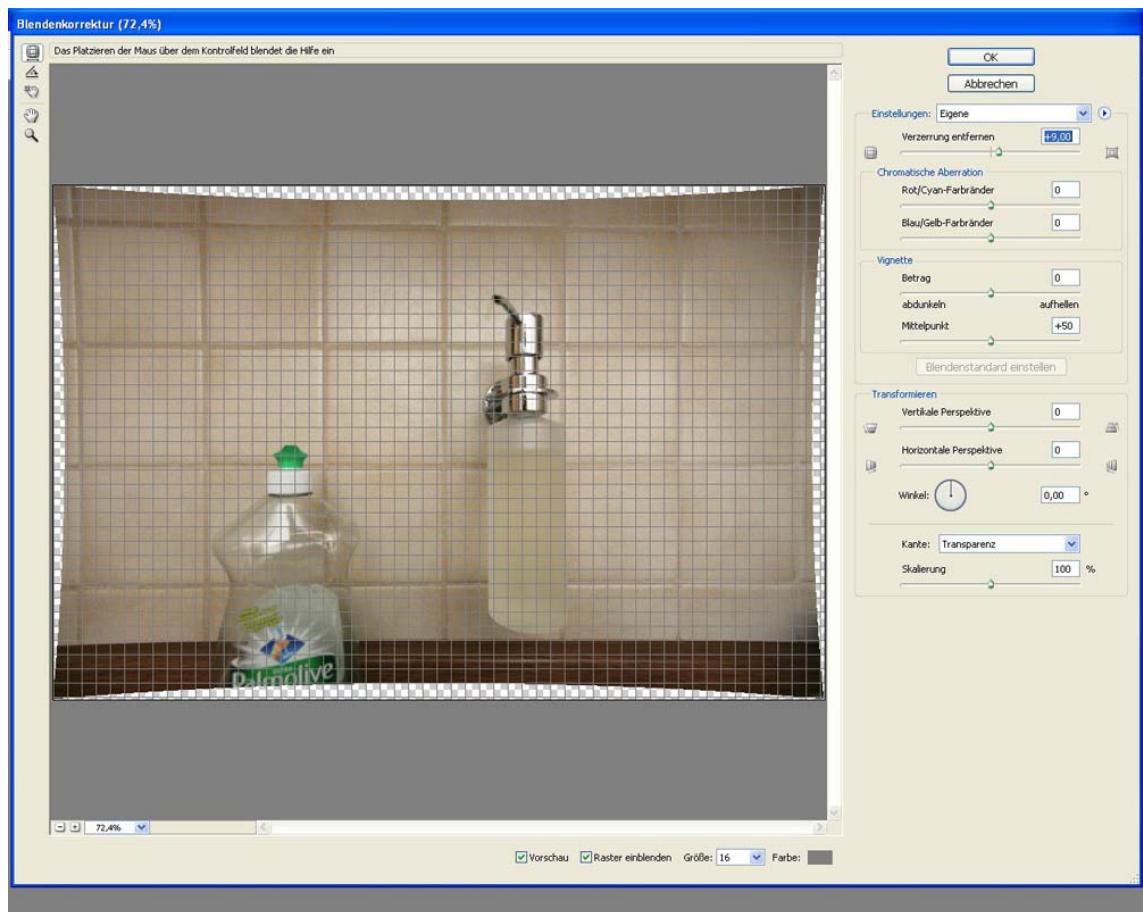
Ganz einfache Korrekturprogramme können nur den Fall $b=0$ korrigieren, also einfache kissen- oder tonnenförmige Verzeichnung. Sie liefern bei wellenförmiger Verzeichnung keine perfekten Ergebnisse.

Digital vorliegende Bilddateien lassen sich hinsichtlich Verzeichnung oder stürzender Linien mit geeigneter Software vielseitig bearbeiten. Störende Abbildungsfehler können damit meist halbautomatisch oder manuell schnell teilweise oder vollständig entfernt werden. Bei RAW-Konvertern (z.B. Canon Digital Photo Professional, Nikon Capture NX2) werden die aus den EXIF-Daten bekannten Objektive teilweise automatisch hinsichtlich Verzeichnung korrigiert.

Unabhängige Korrektur-Software (z.B. DXO Tools, Acolens, PTLens) erlaubt eine individuelle Erstellung von Korrekturprofilen für diverse Objektive.

Photoshop und **Photoshop Elements** bieten eine einfache, aber wirkungsvolle Verzeichnungskorrektur über Schieberegler. Damit lassen sich übliche tonnen- oder kissenförmige Verzeichnungen individuell beseitigen.

Auf diese und weitere Software-Korrekturmöglichkeiten werden wir in einer der nächsten Ausgaben des CLN näher eingehen.



Manuelle Verzeichnungskorrektur in Photoshop