

[Resumen]

En las gamas cercana y macro, la zona dentro de la cual es posible reproducir con una nitidez uniforme un objeto fotografiado es muy pequeña. El artículo presenta un método que permite aumentar digitalmente esta área de profundidad de campo por medio de la denominada extensión de la profundidad de campo, sin falsear en el proceso la información de la imagen. Así mismo, se describe una posibilidad para corregir fácilmente, con ayuda de una aplicación de software, las consecuencias de la presencia de suciedad en el sensor de imagen de una cámara digital.

Palabras clave

Fotografía digital.
Macrofotografía. Procesamiento de imágenes. Extensión digital de la profundidad de campo. Mapa de polvo.

(Quintessenz Zahntech.
2008;34(2):216-26)



Extensión digital de la profundidad de campo asistida por software

Matthias Steinhauser

Introducción

Tanto el procesamiento de imágenes como la fotografía digital han irrumpido en la fotografía dental. Deberían abandonarse las manipulaciones que falsean el resultado de la imagen o que embellecen por ejemplo la estética roja en la zona marginal. Por el contrario, funciones tales como la corrección de encuadre de imagen, el ligero tratamiento posterior para mejorar la nitidez, así como prácticas correcciones de la tonalidad, permiten optimizar la impresión general de la imagen sin alterar su veracidad. El autor sitúa la extensión de la profundidad de campo entre las manipulaciones «permitidas», dado que simplemente compensa por medios técnicos el problema, provocado por limitaciones físicas, de una reproducción absolutamente nítida.

El método «light-scanning»

El problema físico de una profundidad de campo limitada o insuficiente en distancias cortas, así como en la macrofotografía y la microfotografía, continúa siendo un tema de plena actualidad. Se han desarrollado métodos muy interesantes para burlar a las leyes de la óptica técnica. Antes de que el procesamiento digital de imágenes iniciara su marcha triunfal en la fotografía, generalmente era preciso recurrir a medios auxiliares analógicos. Uno de estos métodos es el procedimiento «light-scanning», conocido desde hace ya muchos años. Concretamente, se ilumina el objeto tridimensional con

una rendija de luz claramente delimitada dentro del área de profundidad de campo reproducida con nitidez. Todas las demás zonas permanecen a oscuras. A continuación, durante la toma con el obturador abierto se mueve el objeto hacia el objetivo a lo largo del eje óptico. De este modo se reproducen en la película únicamente las zonas situadas dentro del área de profundidad de campo reproducida con nitidez. La fotografía se crea casi «por rebanadas» sobre un único nivel de película. Se trata de un método genial, pero también relativamente costoso. La solución de software presentada en este artículo se vale de un truco similar, si bien su implementación es puramente «digital».

Se utilizará un ejemplo de cálculo para ilustrar la profundidad de campo extremadamente limitada en escalas de reproducción elevadas. La fórmula para calcular el área de profundidad de campo es la siguiente:

Profundidad de campo

$$a_s = \frac{2 \times k \times u \times (m + 1)}{m^2}$$

donde:

a_s = profundidad de campo [mm]

k = apertura del diafragma

u = diámetro del círculo de confusión (constante) [mm]

m = escala de reproducción

Como ejemplo de cálculo: fotografiamos con nuestra cámara réflex digital con «sensor de imagen de medio formato» en la escala de reproducción (1:1) con un diafragma ajustado de 32. El diámetro del círculo de confusión con sensor de imagen de medio formato es de aproximadamente 0,02 a 0,025 mm según la indicación en la bibliografía. El resultado:

$$a_s = 2 \times 32 \times 0,025 \text{ mm} \times (1 + 1)/(1)^2 = 3,2 \text{ mm}$$

¡Así pues, el área de profundidad de campo de una reproducción absolutamente nítida es de sólo aproximadamente 3,2 mm!

En consecuencia, a distancias cortas y en el ámbito macro la profundidad de campo, esto es, la zona dentro de la cual se reproduce un objeto fotografiado con nitidez absoluta, es muy pequeña. Al fin y al cabo, esta zona depende de la escala de reproducción necesaria, del diafragma de trabajo utilizado, así como del diámetro del círculo de confusión admisible, el cual depende a su vez del tamaño real del sensor de imagen. De ahí que, para escalas de reproducción muy elevadas o en caso de espacios de objeto extendidos, ya no sea suficiente el área de profundidad de campo alcanzable mediante el diafragmado normal. También el denominado diafragma ideal, que tiene en cuenta los fenómenos de difracción de la luz debido a un diafragmado excesivo, impide un aprovechamiento máximo del área de profundidad de campo técnicamente factible.

El procesamiento de imágenes en el ordenador permite burlar las leyes de la óptica técnica y aumentar virtualmente el área de profundidad de campo.

Posibles soluciones



Fig. 1. La fotografía nítida de un objeto en el tamaño de un modelo maestro o de una prótesis puede realizarse en poco tiempo sin necesidad de procesamiento posterior en el ordenador.



Fig. 2. Sin embargo, el método convencional no permite reproducir de forma completamente nítida un «macroobjeto» fuertemente aumentado.

Dado que el método, si bien es sencillo, comporta una inversión de tiempo no despreciable (en comparación con la fotografía convencional), debería aplicarse tan sólo cuando hayan fallado todos los métodos fotográficos convencionales. No tiene sentido aplicar el procedimiento si puede solucionarse el problema mediante un sencillo diafragmado. Esto se demuestra con ayuda del siguiente ejemplo.

Ejemplo de cálculo: Un objeto del tamaño de un modelo de yeso (modelo maestro protésico) o por ejemplo una prótesis se reproduce, utilizando una cámara digital de uso habitual en la fotografía dental con un sensor de imagen del tamaño APS-H (29×19 mm) o APS-C (22×15 mm), a una escala de reproducción de aproximadamente (1:6). De ello resulta, partiendo de un diámetro del círculo de confusión de alrededor de 0,025 mm y de un diafragma de trabajo de 32, un área de profundidad de campo de aproximadamente 67 mm. Esto resulta suficiente para reproducir el objeto íntegramente y con una nitidez absoluta (fig. 1).

Sin embargo, la macrofotografía extrema de un avispon muerto, encontrada en la memoria durante el verano, lleva al área de profundidad de campo hasta sus límites. Enfocada en el ojo facetado y las mandíbulas, quedan difuminados en borrosidad las antenas, las patas y el cuerpo (fig. 2). Así pues, en el momento en que ya no resulta posible alcanzar nuestros objetivos a escalas de reproducción elevadas empleando métodos convencionales, simplemente echamos mano de nuestro arsenal de trucos.

Ámbito de utilización recomendado

Si se requieren escalas de reproducción especialmente elevadas o áreas de profundidad de campo muy extendidas, el software presentado a continuación es un aliado genial para solucionar el problema fotográfico con unos resultados impresionantes.

No obstante, para poder obtener un resultado satisfactorio deben cumplirse un par de requisitos. Dado que durante el procedimiento se funden varias tomas individuales en una imagen conjunta, estas imágenes individuales deben presentar la máxima coincidencia posible. Normalmente, esto requiere un objeto estático, así como el uso de un trípode. De ahí que no sean posibles, o sólo lo sean en un grado restringido, fotografías de pacientes.

El principio básico consiste en tomar varias imágenes individuales del objeto fotografiado, ajustando el enfoque a un nivel distinto cada vez. De este modo se crea en cada imagen una «rebanada de nitidez» en la que se representa la reproducción de forma totalmente nítida. Estas imágenes individuales son virtualmente superpuestas y convertidas en una sola imagen mediante cálculo por el software durante el procesamiento posterior, proceso durante el cual sólo se incluyen en el resultado final las áreas reproducidas nítidamente. Así se obtiene el resultado final absolutamente nítido. Si en la fotografía «normal» generalmente se ajusta la nitidez mediante el ajuste en el objetivo a la distancia de la imagen correspondiente, en la fotografía microscópica, por ejemplo, se ajusta la altura del portaobjetos modificando así la distancia al objeto.

Aspectos básicos

Una de las ventajas reside en el hecho de que las tomas individuales pueden realizarse siempre con el denominado diafragma ideal. Debido a los fenómenos de difracción, si bien con la apertura mínima del diafragma y una escala de reproducción elevada se obtiene la máxima área de profundidad de campo, no se obtiene el resultado de imagen «más nítido» en general. Sin embargo, dado que el resultado de imagen algo peor no tiene tanta importancia como la pérdida de profundidad de campo provocada por un diafragmado insuficiente, normalmente se escoge el menor diafragma posible. El diafragma ideal es el valor de diafragma que arroja el «menor» resultado de imagen con la escala de reproducción escogida. Puesto que obtenemos la profundidad de campo a partir del conjunto de las tomas individuales, en este método podemos utilizar sin problemas el diafragma de trabajo ideal e ignorar la pérdida de profundidad de campo de la imagen individual.

Ventajas

La fórmula para calcularlo es la siguiente:

Diafragma ideal

$$k_f = \frac{u}{1,22 \times \lambda \times (m + 1)}$$

donde:

k_f = diafragma ideal

u = diámetro del círculo de confusión (constante) [mm]

λ = longitud de onda de la luz [mm] (en este caso: 550 nanómetros = 0,00055 mm)

m = escala de reproducción

Ejemplo de cálculo: Queremos obtener con nuestra cámara digital una toma macro en la escala de reproducción de (1:1). ¿Qué diafragma mínimo debería utilizarse? El resultado es:

$$k_f = 0,025 \text{ mm} / (1,22 \times 0,00055 \text{ mm} \times (1 + 1)) = 18,6$$

Esto significa que, para no obtener un desenfoque por difracción excesivo, teóricamente no deberíamos cerrar el diafragma más de $k = 19$ o $k = 22$. Pese a ello, debido a la profundidad de campo de todos modos muy reducida, en la práctica se opta por el diafragma mínimo posible 32. De esta manera se incrementa en cierta medida el área de profundidad de campo, pero se obtiene una cierta falta de nitidez a causa de fenómenos de difracción de la luz.

Aplicación práctica

El método de la extensión de la profundidad de campo asistida por software es muy sencillo, y el manejo del software es casi un juego de niños. Sin embargo, no debe subestimarse el tiempo necesario, de ahí que sólo se aplique el método una vez hayan fracasado las opciones clásicas. Entonces, el software nos brinda la oportunidad de «crear» unas profundidades de campo fenomenales y lograr unos efectos asombrosos. La idea consiste en tomar varias imágenes del objeto a fotografiar desde exactamente el mismo punto. Para cada toma individual se ajusta el enfoque a una distancia distinta. De esta forma se obtienen múltiples tomas individuales, cada una de las cuales contiene únicamente un plano focal concreto. Posteriormente, el software «superpone» y analiza los niveles de imagen individuales, identificando las áreas reproducidas nítidamente y generando a partir de los niveles nítidos individuales un único plano absolutamente nítido. En esto consiste todo el secreto.

Así pues, los requisitos de las tomas individuales se explican prácticamente por sí solos. Todas las imágenes deben obtenerse exactamente desde el mismo punto, los niveles de imagen reproducidos nítidamente deberían solaparse (es decir, necesitamos un número lo suficientemente elevado de tomas individuales), las tomas deberían contar aproximadamente con la misma iluminación y debería tratarse de objetos estáticos. De ahí que trabajemos con un trípode estable y quede automáticamente excluida la reproducción de un objeto en movimiento, como un insecto hormigueante. Manejamos la máquina en modo de enfoque manual. El autor orienta personalmente la cámara con una perspectiva adecuada y a continuación recorre manualmente el rango de distancia de ajuste necesario de la cámara. Por medio del control del visor puede determinarse exactamente si es posible reproducir todas las zonas con una distancia adecuada respecto del borde. A continuación se escoge la preselección de diafragma, se ajusta el diafragma ideal y se crean las tomas gradualmente desde el punto hiperfocal hasta el punto lejano. Con un poco de práctica resulta muy sencillo estimar el número de tomas individuales necesarias. Como fuente de iluminación, el autor suele utilizar una luz permanente, de modo que esté siempre garantizado el mismo efecto luminoso. A continuación se transfieren las imágenes individuales acabadas al ordenador, donde son analizadas por el software. Una vez iniciado el programa, el software calcula a partir de las imágenes individuales una única imagen absolutamente nítida. Para finalizar se recorta la imagen utilizando el programa de procesamiento de imágenes, a fin de conservar el encuadre de imagen exacto deseado.

Otra posibilidad de aplicación interesante consiste en utilizar el software en combinación con la fotografía microscópica. Allí se dan escalas de reproducción y aumentos sensiblemente superiores a los de la macrofotografía convencional, y en consecuencia el área de profundidad de campo es allí considerablemente más pequeña.

Ejemplos de imagen

Hasta aquí la teoría pura y dura, la cual no obstante debe considerarse como profunda piedra angular de la fotografía dental profesional. Sirve para evitar que lleguen a producirse resultados insatisfactorios, o para analizarlos y aplicar soluciones personalmente. Los siguientes ejemplos pretenden ilustrar las posibilidades que el software brinda al usuario.

Macrofotografía

En el siguiente ejemplo se debe reproducir desde arriba en ángulo oblicuo la forma alargada de la superficie de masticación de un oso cavernario. Sin embargo, con el ajuste de diafragma ideal no fue posible reproducir de forma absolutamente nítida el

diente con una única imagen. Bastaron unas pocas tomas para reproducir el diente de forma absolutamente nítida en todo su esplendor (figs. 3 a 7).

El siguiente ejemplo muestra un poste de implante. En el fondo azul monocromo se aprecia claramente la partícula de polvo sobre el sensor de imagen (figs. 8 a 11). A fin de lograr un resultado algo más atractivo, se aisló el implante de la imagen final y se colocó sobre un fondo con un ligero gradiente (fig. 12).

Un objeto alargado, como una mina de bolígrafo, también constituye un cierto desafío en el ámbito macro, y también puede reproducirse de forma absolutamente nítida. Sin embargo, el ejemplo muestra tan sólo la primera imagen de la serie (fig. 13) y el resultado terminado (fig. 14).



Fig. 3. El enfoque se desplaza desde el borde distal del diente del oso cavernario...



Fig. 4. ... lo largo de la superficie masticatoria lentamente hacia el centro masticatorio, ...



Fig. 5. ... y desde allí continúa en dirección mesial...



Fig. 6. ... para finalizar en las puntas de las cúspides mesiales.



Fig. 7. El resultado muestra el diente de oso en todo su esplendor.



Figs. 8 a 11. En la representación espacial del poste de implante utilizando el diafragma ideal en la imagen individual, el área de profundidad de campo no se extiende a lo largo de todo el espacio del objeto.



Fig. 12. Se liberó el tornillo de implante y se colocó, mediante un programa de procesamiento de imágenes, sobre un fondo gradiente.



Fig. 13. En la primera imagen, el enfoque se sitúa sobre la punta de la mina de bolígrafo.



Fig. 14. Sin asistencia por software es imposible representar de esta forma la toma macro extrema de la mina de bolígrafo.

Además de para la macrofotografía, el método se puede utilizar también en distancias cortas para espacios de objeto extendidos, como en el caso de un tren en miniatura.

Un problema que no debe subestimarse en la fotografía digital, especialmente en la macrofotografía y la microfotografía, es la presencia de minúsculas partículas de polvo sobre el sensor de imagen. Se trata de un problema inherente al sistema y se debe, entre otras causas, a la carga estática del sensor de imagen. Para permitir apreciar estos puntos negros en las imágenes ejemplares, simplemente se han dejado sin eliminar en algunas imágenes. Esto ha llevado a algunos fabricantes a colocar un denominado «filtro protector antipolvo» delante del sensor de imagen propiamente dicho. El filtro es de «cristal», y durante el proceso de limpieza se excita hasta la «vibración» mediante «ultrasonidos». De este modo, el polvo adherido es sacudido y atrapado por una capa adhesiva ubicada en la base interior del cuerpo de la cámara, de forma similar a una tira atrapamoscas pegajosa. Utilizando su propia cámara puede observar muy fácilmente la forma en que este polvo se hace notar en la práctica. Fotografíe con el diafragma mínimo y la escala de reproducción máxima una hoja de papel blanca (comparar con la figura 21). Dependiendo del grado de suciedad del sensor de imagen de su cámara, quedará aliviado o realmente alarmado. Para la limpieza es aconsejable seguir las indicaciones del fabricante. El problema del polvo se agrava sensiblemente por las escalas de reproducción elevadas, así como por el diafragmado acusado. La industria ha reaccionado desarrollando un software que elimina mediante cálculo, a partir de una imagen de referencia creada, los puntos oscuros provocados por la suciedad. También Helicon (Kharkov, Ucrania) ofrece una herramienta de este tipo. Para ello, antes o después de fotografiar las imágenes individuales se toma una imagen de referencia de una superficie blanca. Esta imagen de referencia, que contiene los pequeños puntos negros provocados por la suciedad, se carga en el programa antes del cálculo junto con las imágenes individuales. Durante el procesamiento posterior mediante la función «mapa de polvo», el software elimina automáticamente mediante cálculo los errores.

El manejo del software resulta muy sencillo tras un breve período de familiarización. Para empezar, el software carga las imágenes individuales y opcionalmente el mapa de polvo creados fotográficamente con anterioridad. A continuación se marcan las casillas

Trabajo con el software
y solución del problema
del polvo

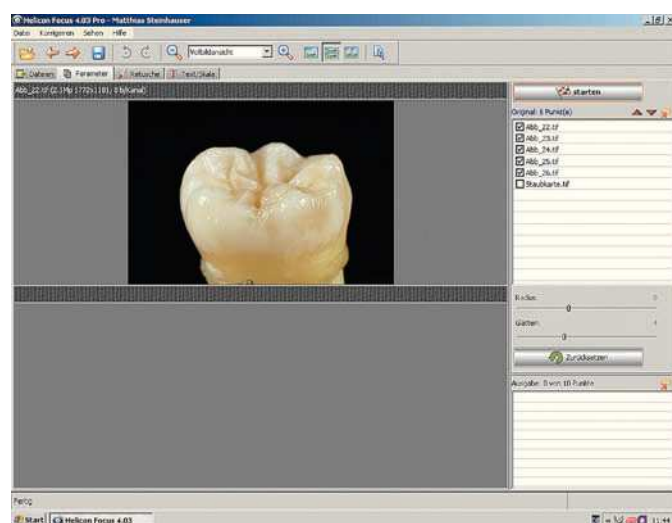


Fig. 15. En primer lugar, el software carga las imágenes individuales.

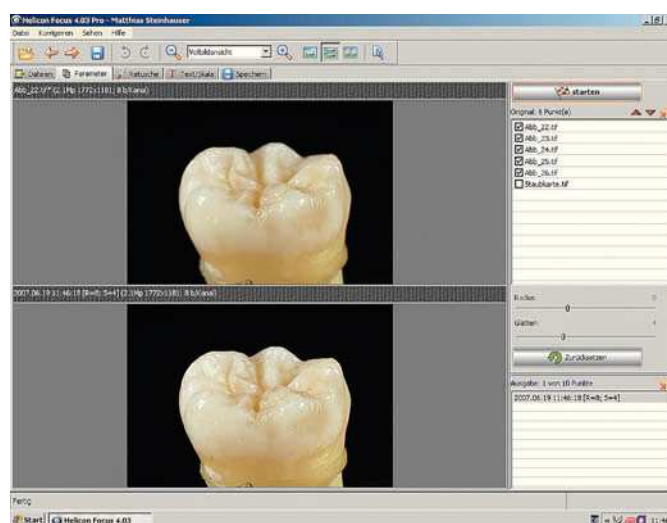


Fig. 16. Sin la función de mapa de polvo, el resultado con el sensor de imagen sucio es insatisfactorio.

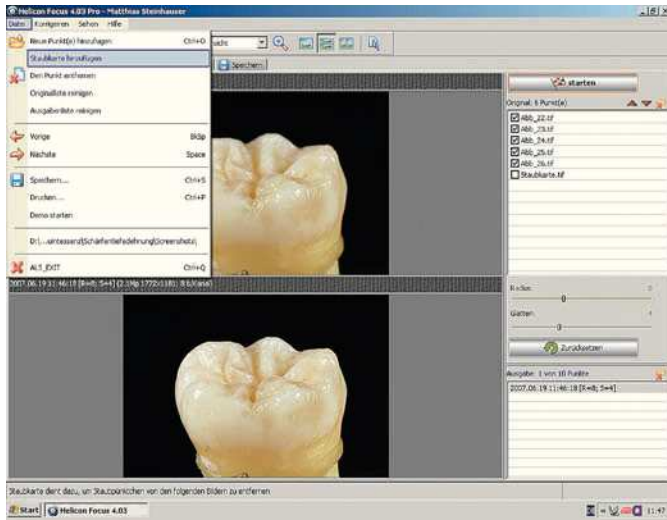


Fig. 17. Mediante la orden «Añadir mapa de polvo» se encamina la solución del problema del polvo.

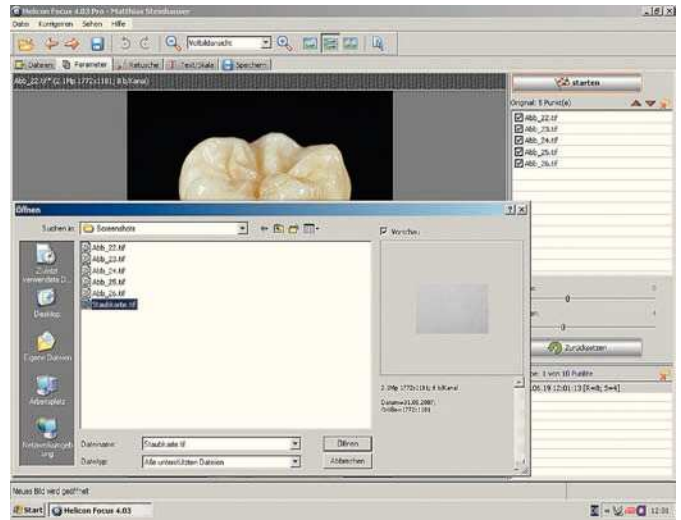


Fig. 18. Para ello se selecciona y se abre manualmente el «mapa de polvo» previamente creado.

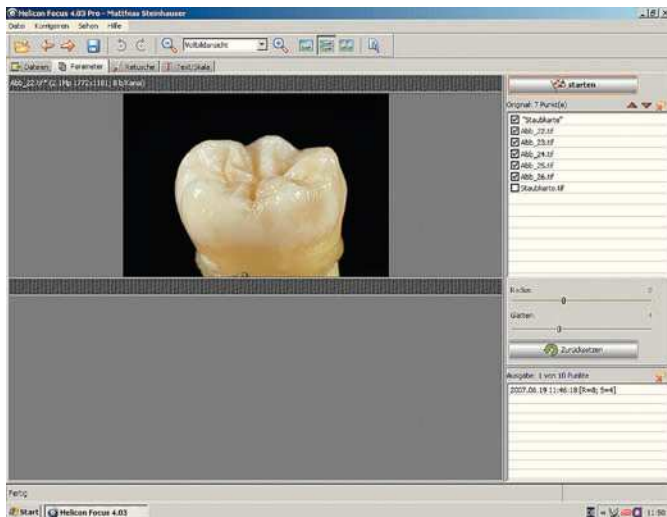


Fig. 19. El software incluye el mapa de polvo en los cálculos como «imagen de referencia».

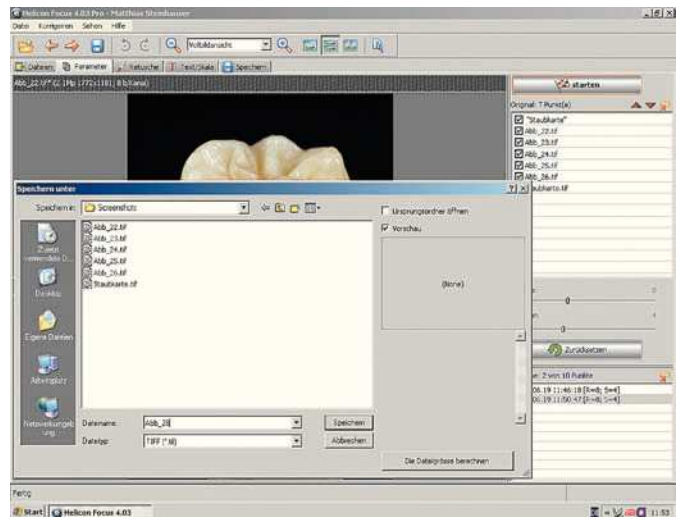


Fig. 20. Finalmente se guarda con el nombre de archivo deseado el resultado calculado.



Fig. 21. El polvo sobre el sensor de imagen se hace notar especialmente a escalas de reproducción elevadas, abertura del diafragma reducida y porciones de la imagen claras.

de las imágenes individuales que deben incluirse en el cálculo (fig. 15). Al «Iniciar» el programa se obtiene un primer resultado, si bien éste no incluye todavía la función de mapa de polvo (fig. 16). Mediante la orden «Añadir mapa de polvo» se encamina entonces la solución del problema del polvo (fig. 17). Para ello se selecciona y se abre manualmente el «mapa de polvo» previamente creado (fig. 18). A fin de evitar confusiones con mapas de polvo «obsoletos», este mapa de polvo debería encontrarse en la misma carpeta que las imágenes individuales en cuestión. El software utiliza este «mapa de polvo» para eliminar mediante un algoritmo los puntos negros que aparecen debido a la suciedad presente en el sensor de imagen (fig. 19). A continuación puede guardarse la imagen resultante con el nombre de archivo que se desee (fig. 20). Posteriormente puede utilizarse el programa de procesamiento de imagen habitual para realizar una selección final de encuadre de imagen, una ligera definición y otras funciones de procesamiento de la imagen.

El último ejemplo muestra un mapa de polvo, las imágenes individuales, así como el resultado de la anterior toma macro de una muela del juicio natural. En la figura 21 se muestra el ejemplo de un mapa de polvo como el anteriormente descrito. A su vez, las figuras 22 hasta la 26 permiten apreciar las tomas individuales. La figura 27 muestra el resultado defectuoso sin utilizar el mapa de polvo que sí se incluyó en el cálculo para obtener el resultado presentado en la figura 28 y que se refleja en un resultado perfecto.

Para evitar sobrecargar el artículo con una cantidad excesiva de imágenes ejemplares «idénticas» y en aras de la integridad, cabe mencionar que para el montaje de la imagen definitiva asistido por ordenador se crearon más imágenes (hasta un máximo de ocho) de los distintos planos focales de las que se reproducen en el presente artículo.

Correctamente aplicada, la extensión de la profundidad de campo constituye un instrumento magnífico para la fotografía de objetos, y el autor confía en que su artículo anime a algunos lectores a utilizar con éxito este instrumento en el futuro. Para obtener información adicional sobre la herramienta Helicon Focus puede visitarse el sitio web www.HeliconFocus.com. Otra posibilidad se encuentra en el sitio www.denfo.de, en

Conclusión



Fig. 22. En la toma con el diafragma ideal...



Fig. 23. ... el área de profundidad de campo de la muela del juicio fotografiada...



Fig. 24. ... no abarca toda el área de la superficie de masticación.



Figs. 25 y 26. Las partículas de polvo sobre el sensor de imagen de la cámara digital se manifiestan de nuevo como molestos puntos negros.



Fig. 27. Sin «mapa de polvo», el software calcula las partículas de polvo de las imágenes individuales como líneas que estropean el resultado.



Fig. 28. Con la función «mapa de polvo», el software genera, pese a las imágenes de partida «sucias», un resultado convincente e impresionante.

cuya sección «Bildeforum» se pueden exponer también los resultados de fotografía dental propios.

Correspondencia

Matthias Steinhauser, Ingenieurbüro Aktopolis.
Georgstrasse 24, 88212 Ravensburg, Alemania.
Correo electrónico: M.Steinhauser@aktopolis.de