

Virtueller Prototyp des in [3] definierten Kameraobjektivs. Außer den Linsen sind nur solche Mechanikteile modelliert, die potenziell zum Störlicht beitragen

Auf Geisterjagd

STÖRLICHTANALYSE IN DER ABBILDENDEN OPTIK

Abbildungssysteme, die mit Linsendesignprogrammen entworfen werden, sind oft nicht praxistauglich. Die Lichtstreuung an den mechanischen und optischen Flächen sowie Mehrfachreflexe verschlechtern die Bildqualität oft so stark, dass die Spezifikationen nicht erfüllt werden. Führt man zu einem frühen Zeitpunkt im Designprozess eine Störlichtanalyse mit nichtsequenziellem Raytracing durch, lassen sich rechtzeitig Maßnahmen ergreifen, um Störlicht zu reduzieren und Fehlentwicklungen zu vermeiden.

**EBERHARD LANGE
BERNHARD MICHEL**

Für die Entwicklung abbildender optischer Systeme – zum Beispiel von Objektiven, Teleskopen und Mikroskopen – verwendet man seit vielen Jahrzehnten sogenannte sequenzielle Raytracing-Software (Linsendesignprogramme). Die Strahlen treffen dabei in einer fest vorgegebenen Reihenfolge auf die optischen Flächen. Die Qualitätsparameter des optischen Systems, zum Beispiel Spotgröße, Bildfeldverzeichnung und -wölbung, sowie andere Aberrationen lassen sich damit sehr einfach und schnell berechnen. Sequenzielle Raytracer sind daher sehr gut für das Optimieren von abbildenden Systemen geeignet, das heißt zur

iterativen Anpassung der Systemdaten wie Vertexpositionen, Krümmungsradien oder Glastypen der Linsen, bis der Prozess ein lokales oder im Rahmen der Randbedingungen ein globales Optimum findet. Auch die Systemtoleranzen lassen sich mit solchen Programmen recht elegant untersuchen. Sequenzielles Raytracing vernachlässigt jedoch folgende physikalischen Effekte:

- Sowohl die Linsenoberflächen als auch die mechanische Umgebung der Linsen (Linsenfassungen, Blenden, Gehäuse) streuen das Licht. Teile des Streulichts können auf die Bildebene fallen. Meist bewirkt dies einen diffusen strukturlosen Hintergrund. Es können aber auch scharfe Reflexe auftreten (Hot Spots).
- Linsenflächen, aber auch der Detektor

(beispielsweise der Film oder CCD-Chip) reflektieren einen Teil des Lichts. Durch Mehrfachreflexion kann das reflektierte Licht auf die Bildebene gelangen. Zusätzlich zum eigentlichen Bild entsteht so ein überlagertes, meist unscharfes Geisterbild. Je mehr optische Flächen sich in einem System befinden, desto wichtiger werden die Geisterbilder. Die Hauptursache ist dabei oft die Reflexion am Detektor selbst (sogenannter Narzissmus).

Nachbessern birgt Risiken

Licht, das durch Reflexe oder Streuung auf die Bildebene gelangt, bezeichnet man als Störlicht oder Falschlicht. Die Störlichtquelle kann sowohl die zu beobachtende Lichtquelle selbst (Nutzlicht) als auch

eine andere Lichtquelle sein, etwa eine Straßenbeleuchtung bei der Beobachtung des Sternenhimmels mit einem Teleskop. Eine Störlichtquelle kann sich auch weit außerhalb des eigentlichen Sichtfelds des Abbildungssystems befinden. Das Störlicht gelangt dann gewissermaßen über Bande auf die Bildebene. Auch andere Effekte wie Beugung, Doppelbrechung und Absorption können die Qualität des Abbildungssystems negativ beeinflussen, werden hier aber nicht näher diskutiert.

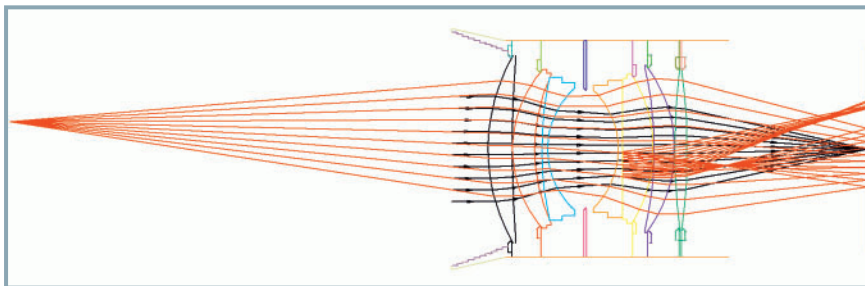
Oft bildet das Design, das mit sequenziellem Raytracing entwickelt wurde, bereits die Grundlage für den Prototypen. Man untersucht Störlichtprobleme dann direkt am Prototypen in der Hoffnung, kleine Nachbesserungen würden genügen, um daraus ein voll funktionierendes Abbildungssystem zu entwickeln. Mit entsprechender Erfahrung funktioniert dieses Vorgehen oft. Es birgt jedoch erhebliche Risiken:

- Sind viele Nachbesserungen nötig, wird die Entwicklung langwierig und teuer.
- Es gibt oft keine Systematik, um die Fehlerursache am Prototypen zu finden.
- Die vollständige, experimentelle Unter-

sie – falls möglich – beheben, bevor der erste reale Prototyp aufgebaut wird. Dies spart Zeit und Kosten und macht den weiteren Projektverlauf besser kalkulierbar. Die Störlichtanalyse am virtuellen Prototyp kann man als eine Art Versicherung betrachten, die dazu beiträgt, unwägbarere Projektrisiken und damit ökonomischen Schaden zu vermeiden.

Strahlengang vollständig rekonstruieren

Sogenannte nichtsequenzielle Raytracing-Programme modellieren die Lichtausbreitung physikalisch korrekt und sind daher zur Simulation virtueller Prototypen optimal geeignet. Der Strahlengang durch das System liegt nicht von vorneherein fest. Vielmehr berechnet der Raytracer ständig neu, welches physikalische Objekt ein Strahl als Nächstes trifft. Als physikalisches Objekt bezeichnet man die Linsen mit realistischen Oberflächen- und Materialeigenschaften und alle Mechanikteile, zum Beispiel die Linsenfassungen und Blenden, die in den meisten Fällen aus einem CAD-Programm importiert werden.



1 Strahlengang für ausgewählte Reflexpaare

suchung des Störlichtverhaltens ist meist zu aufwendig, da der Parameterraum zu groß ist (Störlichtquellen unter allen Winkeln und Abständen).

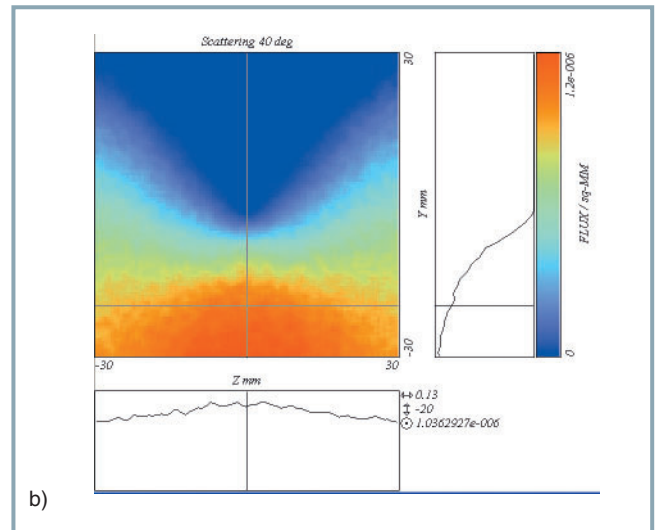
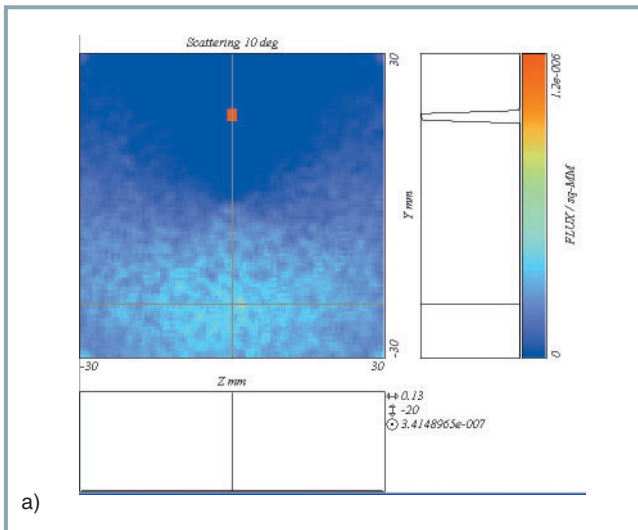
- Schlimmstenfalls ist es mit den vorhandenen Ressourcen unmöglich, den Prototypen so weit zu korrigieren, dass die Spezifikationen erfüllt werden. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass das gesamte Projekt scheitert.

Sicherer mit virtuellen Prototypen

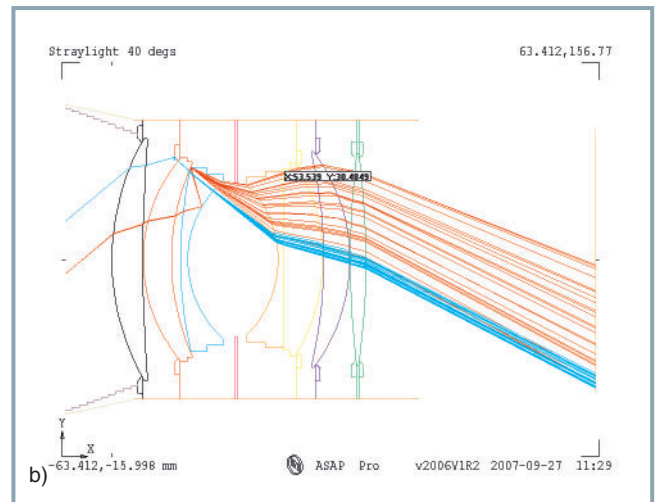
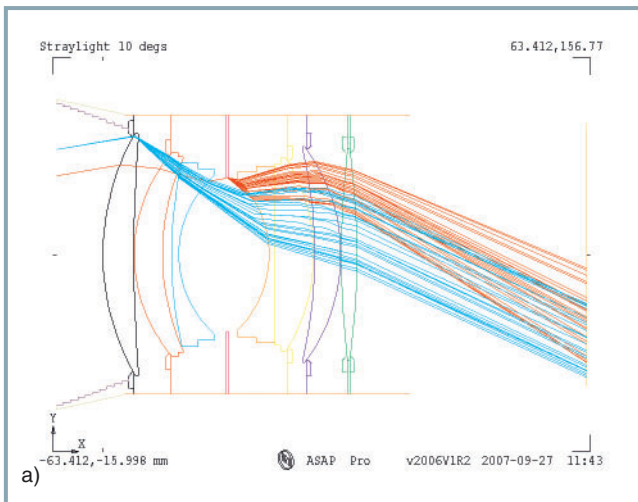
Der sicherste, effizienteste und daher empfehlenswerte Weg zur Bewertung des Störlichts ist die Analyse eines virtuellen Prototyps. Dabei erkennt man Störlichtprobleme schon am Computer und kann

Nichtsequenzielle Raytracer berücksichtigen sowohl die Reflexion an Oberflächen als auch die diffuse Streuung. Basis für die Streumodelle sind idealerweise Messdaten der sogenannten BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function). Da sowohl durch Reflexion an Oberflächen als auch durch Streuung die Zahl der Strahlen im System erheblich zunimmt, stellen geeignete Abbruchkriterien (maximale Zahl der Reflexionen/Streuprozesse pro Strahl) sicher, dass sich die Simulation in einem vertretbaren und vor allem in einem sinnvollen Zeitrahmen abschließen lässt.

Nichtsequenzielle Raytracing-Programme liefern nicht nur die Intensitätsverteilung des Störlichts in der Bildebene. Mit ihnen lässt sich der Strahlengang des ▶



2 Streulichtverteilung des Lichts in der Bildebene für kollimiertes Licht unter einem Einfallswinkel von a) 10° und b) 40°



3 Strahlengänge, welche die Hauptbeiträge des Streulichts in Bild 2a und 2b liefern

► Störlichts vollständig rekonstruieren. Geeignete Strategien machen es möglich, die Ursachen des Störlichts systematisch zu analysieren. Auch der Effekt von Abhilfemaßnahmen lässt sich so gezielt untersuchen.

Hierbei ist zu beachten, dass das verwendete, nichtsequenzielle Programm die entsprechenden Möglichkeiten bietet, eine solche Analyse überhaupt durchzuführen. Flexibilität und Automatisierbarkeit sind weitere entscheidende Kriterien für ein geeignetes Programm. Diese sind wichtig, da komplizierte optomechanische Systeme oft aus Tausenden von Einzelobjekten bestehen, die eine manuelle Analyse nahezu unmöglich machen. Eine leistungsfähige Skriptsprache, die die Automatisierung unterstützt, ist ein entscheidender Vorteil.

Für das folgende Anwendungsbeispiel verwenden wir den Klassiker unter den

nichtsequenziellen Raytracern, das »Advanced Systems Analysis Program« (ASAP) der Firma Breault Research Organization (BRO). Diese Software wurde ursprünglich speziell für Störlichtuntersuchungen im Weltraum- und Luftfahrtbereich entwickelt und bietet daher von vorneherein die für eine effiziente Störlichtanalyse nötige Infrastruktur. Einen guten Überblick über die Störlichtanalyse mit ASAP bietet die Multimedia-Galerie von BRO [4].

Störlichtanalyse am Kameraobjektiv

Für das Beispiel verwenden wir das bestehende, frei zugängliche Design eines Kameraobjektivs [3]. Um zu einem virtuellen Prototypen zu gelangen, bauen wir skriptgesteuert in wesentlichen Details realistische Linsenfassungen, ein vereinfachtes Gehäuse und Linsenränder dazu (Titel-

bild). Den Linsenoberflächen ordnen wir geeignete Antireflexbeschichtungen zu, den lackierten Linsenrändern ein realistisches mattschwarzes Streumodell. Wir modellieren nicht alle Mechanikteile, sondern nur die in unmittelbarer Nähe des Strahlengangs, da diese meist die Hauptursache für Streulichtprobleme sind. Auch die spekulare Reflektivität des Detektors, im vorliegenden Falle des Films, ist im Modell berücksichtigt. Das Objektiv ist auf »Unendlich« eingestellt mit Blende f/1,4.

Die Geistersuche beginnt

Das vollständige Mechanikdesign erstellt man erst nach dieser Analyse. Auf diese Weise arbeitet man sich iterativ an das optimale Design heran, indem man den virtuellen Prototypen jeweils auf den neuesten Stand bringt. Geisterbilder entstehen durch Mehrfachreflexionen. Falls sich

im Strahlengang keine Spiegel befinden, ist mindestens eine Zweifachreflexion nötig, um Störlicht auf dem Detektor zu erzeugen. Reflexe noch höherer Ordnung können ebenfalls dazu beitragen, sind aber meist deutlich schwächer und bei Abbildungssystemen vernachlässigbar, es sei denn, es tritt eine Totalreflexion auf. Wir beschränken uns daher auf die Geister zweiter Ordnung, lassen aber zusätzlich Totalreflexion beliebig hoher Ordnung zu.

Die Lichtverteilung der Geister in der Bildebene zeigt **Bild 4a**. Hier wird eine punktförmige, weiße Störquelle in unendlichem Abstand und unter einem Winkel von 10° zur optischen Achse angenommen (vertikales Bildfeld $\pm 17^\circ$). Deutlich sieht man die verschiedenen Reflexe, die sich zum Teil auf der Seite, zum Teil aber auch auf der Gegenseite des eigentlichen Bilds der Lichtquelle befinden. Die Reflexe unterscheiden sich bezüglich ihrer integralen Leistung und ihrer Verteilung in der Bildebene. Da mit einer hohen spektralen Auflösung gerechnet wurde, treten Reflexfarben und Farbränder deutlich hervor.

Bei der Mehrzahl der Anwendungen sind fokussierte Geisterbilder besonders

störend. Durch eine Pfadanalyse ist es einfach, die verschiedenen Reflexe zu identifizieren. Die **Bilder 4b bis 4f** zeigen die isolierten Ursachen der stärksten Reflexe: b) Reflex an der Rückseite der Linse 2 (L2R) und der Vorderseite von Linse 6 (L6V), c) L6V + L7V, d) L2V + L7R, e) L1V

KONTAKT

Simuloptics GmbH,
91125 Schwabach,
Tel. 0 91 22 /8 30 -3 00,
Fax 0 91 22 /8 30 -3 03,
www.simuloptics.de

+ L5R. Besonders ausgeprägt ist der Doppelreflex am Film und jeweils einer der Linsenflächen (**Bild 4f**). Hier dominieren L7V, L6V (helle, sich überlagernde Flächen) und L2R (grauer Hof).

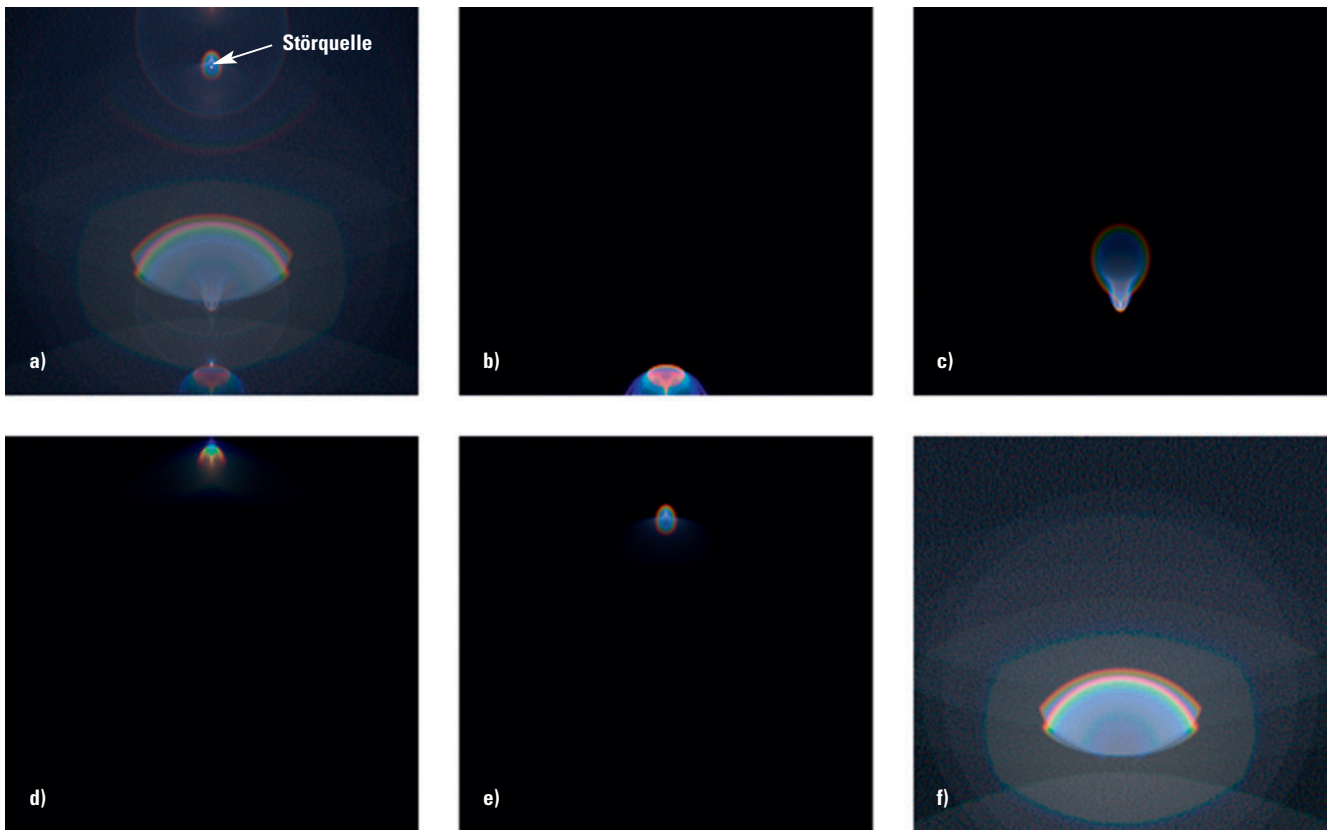
Geistersuche rückwärts

Mit dieser Methode ist es kaum möglich, die Geisterbilder für alle Kameraeinstellungen vorherzusagen. Wenn es aber vor

allem darum geht, fokussierte Reflexe zu vermeiden, kann man die Simulation umdrehen, das heißt, man setzt eine Punktlichtquelle in die Bildebene, sendet das Licht von hinten durch das Objektiv und bestimmt die Fokusse der Geisterbilder im Objektraum. Wegen der Umkehrbarkeit des Lichtwegs erzeugen Punktlichtquellen, die sich an diesen Fokussen befinden, fokussierte Geisterbilder in der Bildebene (**Bild 1**). Es gibt noch weitere Methoden, auf die hier nicht eingegangen werden kann.

Um die auffälligsten Geister abzuschwächen, genügt oft schon ein geringfügiges Re-Design des Linsensystems. Die Abbildungseigenschaften von gleichwertigen Designs unterscheiden sich bezüglich der Geister oft völlig. Idealerweise hat man daher mehrere alternative Designs zur Verfügung, von denen man sich das bezüglich der Reflexe beste aussucht.

Der Einfachheit halber soll hier nur Licht untersucht werden, das an Mechanikteilen gestreut wird und ungeschwächt, das heißt direkt oder über Totalreflexion, auf die Bildebene fällt. Wenn ein Lichtstrahl auf ein Mechanikteil fällt, entsteht Streulicht. Dieses modellie- ▶



4 a) Lichtverteilung der Geister in der Bildebene in realistischer Farbdarstellung (CIE-Farbmodell); b) bis f) zeigen die Beiträge einzelner Reflexpaare

ren wir durch einen oder mehrere Strahlen, die anschließend durch das System verfolgt werden. Entscheidend ist hierbei, nur solche Streustrahlen zu erzeugen, die zumindest mit großer Wahrscheinlichkeit auch tatsächlich die Bildebene treffen (Importance Sampling). Alle anderen Strahlen hätten keinen Einfluss auf die Bildqualität. Sie würden lediglich Rechenzeit verschwenden, unter Umständen so viel, dass die Störlichtanalyse vollkommen aussichtslos wird.

Dem Streulicht auf der Spur

Eine Faustregel bei der Störlichtanalyse besagt, dass man typischerweise 90 Prozent der Störlichtursachen in 10 Prozent der Zeit finden kann. Bei einfachen Systemen mit geringen Leistungsanforderungen (wie im vorliegenden Fall) können wenige Tage für eine Störlichtanalyse ausreichen. Bei komplexen Hochleistungsoptiken kann die Störlichtanalyse jedoch auch einige Monate pro Iteration beanspruchen.

Wenn die Zielrichtungen der Streustrahlen feststehen, kann die eigentliche Streulichtsimulation beginnen. Diese Analyse (Verteilung in der Bildebene, Identifikation der streuenden Objekte) ähnelt der Geisteranalyse. **Bild 2a** zeigt die

Streulichtverteilung in der Bildebene, wobei die gleiche Lichtquelle wie zuvor verwendet wurde. **Bild 2b** zeigt die Verteilung des Streulichts, wenn die Lichtquelle unter 40° einstrahlt, also weit außerhalb des Sichtfelds des Objektivs. Die **Bilder 3a** und **3b** zeigen jeweils die beiden Strahlengänge, die hauptsächlich zum Streulicht in den **Bildern 2a** und **2b** beitragen.

Zur Streulichtreduktion steht eine Reihe von Strategien zur Verfügung. Beispielsweise kann man einzelne Linsenradien größer wählen, um besonders stark streuende Mechanikteile weiter aus dem Strahlengang zu rücken, oder man kann die streuende Fläche verringern – etwa indem man skriptgesteuert die Krümmungsradien der streuenden Fassungsstücke verringert, oder deren Neigungswinkel ändert. Den Erfolg solcher Maßnahmen bewertet man dann ebenfalls wieder mit einem modifizierten virtuellen Prototyp.

Simuloptics vertreibt im Namen von BRO die nicht-sequenzielle Raytracing-Software ASAP und führt auf Anfrage Geister- und Streulichtanalysen durch. ■

Fazit: Flexibel und rechenstark

Die Durchführung von Störlichtuntersuchungen an einem virtuellen Prototyp hilft, Störlichtprobleme zuverlässig vorherzusagen und Gegenmaßnahmen zu entwickeln, noch bevor ein echter Prototyp erstellt worden ist. Dies spart Zeit und Kosten und macht den weiteren Projektverlauf besser kalkulierbar. Die nichtsequenzielle Raytracing-Software ASAP bietet leistungsfähige Tools für die Untersuchung von Geistern und Streulicht. Aufgrund ihrer flexiblen Skriptsprache und hohen Rechengeschwindigkeit ist sie für die Störlichtanalyse besonders gut geeignet.

AUTOREN

EBERHARD LANGE und BERNHARD MICHEL sind geschäftsführende Gesellschafter von Simuloptics in Schwabach.

LITERATUR

- 1 B. Michel, T. Beck, »Raytracing im Einsatz für die Medizin«; *Laser+Photonik* 5/2005, S. 38-41
- 2 B. Michel, E. Lange »Kreatives Raytracing«, *Photonik* 3/2006, S. 56-59
- 3 W. J. Smith »Modern Lens Design (Second Edition)« ; S. 341, (K. Wakamiya, USP 4,448,497)
- 4 www.breault.com/multimedia-gallery.php