

Kreatives Raytracing

Bernhard Michel, Eberhard Lange,
Simuloptics GmbH, Schwabach

Für virtuelles Prototyping werden in der Industrie zunehmend nichtsequenzielle Raytracer eingesetzt. Diese können jedoch viel mehr: sie ermöglichen detaillierte Analysen optischer Systeme und helfen so, deren Eigenschaften zu verstehen. Dies ist meist die Grundlage für eine zielstrebige Optimierung. Vom Benutzer kreativ eingesetztes und kontrolliertes Raytracing mit speziellen Software-Möglichkeiten kann die Rechenzeit um viele Größenordnungen senken und macht so gewisse Problemstellungen erst zugänglich für die Optiksimation.

Die Standardmethode zur realitätsgetreuen Simulation optischer Systeme ist nichtsequenzielles Raytracing: man gibt hierbei die Reihenfolge der Objekte, auf die ein Strahl trifft, nicht fest vor, sondern berechnet sie während der Strahlausbreitung. Auf diese Weise erhält man ein im Rahmen der geometrischen Optik korrektes physikalisches Modell: Fresnelreflexion und -transmission, Streuung an Oberflächen und im Volumen, ausgedehnte Lichtquellen, aber auch die Wechselwirkung mit Schichtsystemen, Beugungsgittern und diffraktiv optischen Elementen lassen sich so simulieren. Berücksichtigt man die optische Weglänge, so lässt sich das Verfahren auch auf kohärente optische Systeme anwenden [1]. Präzise Eingabedaten vorausgesetzt, eignet sich nichtsequenzielles Raytracing ideal für die Erzeugung virtueller Prototypen und wird hierfür auch in großem Umfang in der Industrie eingesetzt.

Dies verlagert die Entwicklung, und damit auch meisten Entwicklungsprobleme, vom Labor in den Computer. Erfüllt ein realer Prototyp die System-Spezifikationen nicht, so wird es der virtuelle Prototyp ebenfalls nicht tun. Wenn beispielsweise ein Scheinwerfer-Prototyp Grenzwerte für Blendung überschreitet, so wird dies der virtuelle Prototyp lediglich bestätigen, er liefert jedoch

meist keine zusätzlichen Hinweise, *warum* Blendung auftritt oder wie man diesen Fehler beheben könnte.

Nichtsequenzielle Raytracer können jedoch viel mehr als das Verhalten optischer Systeme lediglich zu *verifizieren*: mit ausgefeilten Analysemethoden helfen sie, ein optisches System zu *verstehen*. Analysieren bedeutet, Fragen an das optische System zu stellen. Auf geschicktes Fragen liefert der Raytracer Antworten, die bei der Problembehebung oder bei der Systemoptimierung entscheidend weiterhelfen. Dies setzt natürlich voraus, dass das verwendete Softwarepaket solche Fragen überhaupt zulässt.

Dieser Aufsatz zeigt anhand bewusst einfach gehaltener Beispiele, wie man Raytracing trickreich für die Analyse optischer Systeme einsetzt, um mit minimalem Zeitaufwand ein Maximum an Fragen zu beantworten. Die Simulationen wurden mit dem Optikprogramm ASAP der Breault Research Organization durchgeführt (die verwendeten Kommandos sind in Klammern angegeben).

1 Modell einer Taschenlampe

Wir betrachten eine idealisierte Taschenlampe (**Bild 1a**), bestehend aus einer Glüh-

wendel und einem Parabolspiegel, die eine entfernte Wand beleuchtet (alle anderen Bauteile sind für die Betrachtung unwesentlich). An einem Beispiel wie diesem können wir sehr anschaulich die Möglichkeiten optischer Analyse vorführen.

Befindet sich der Mittelpunkt der Glühwendel vor dem Fokus des Reflektors, erwarten wir eine Strahlaufweitung, so dass ein größerer Bereich der Wand beleuchtet wird. Die Simulation ergibt die in Bild 1b dargestellte Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Wand. Sie besteht aus einem Fleck in der Mitte, der von einem Ring umgeben ist sowie einem diffusen Hintergrund. Naiv würde man bei einer defokussierten Optik nur einen unscharfen Fleck in der Mitte erwarten. Woher kommt der Ring?

Um dies herauszufinden, könnte man einzelne Strahlenpfade graphisch darstellen und mit etwas Glück die Strahlen finden, die den Ring verursachen. Wir schlagen hier aber einen anderen, systematischen und auch bei komplexen Systemen erfolgreichen Weg ein.

Zunächst verschafft man sich einen Überblick über alle Strahlenpfade (PATHS), die auf die Wand treffen:

- 5% der Strahlen treffen die Wand, ohne den Reflektor berührt zu haben. Dies ist das direkt nach vorne abgestrahlte Licht.

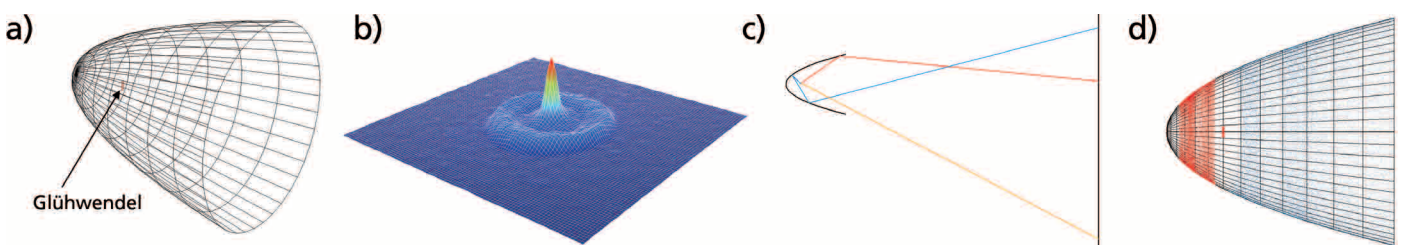


Bild 1: a) Einfaches Modell einer Taschenlampe: Parabolreflektor mit Glühwendel (außerhalb des Fokus); b) Beleuchtungsstärkeverteilung der Taschenlampe auf einer entfernten Wand; c) repräsentative Strahlenpfade: direktes Licht (gelb), einfach reflektiertes Licht (rot) und zweifach reflektiertes Licht (blau); d) Analyse des zweifach reflektierten Lichts, das den Ring in b) erzeugt: das Licht trifft von der Glühwendel auf den rot markierten Bereich des Reflektors und wird von dort über den blau markierten Bereiche zur Wand abgestrahlt

- 40% des von der Glühwendel abgestrahlten Lichts wird einmal am Reflektor reflektiert.
- 55% – und das ist überraschend viel – wird zweimal am Spiegel reflektiert. Dies ist bereits ein Hinweis auf die Herkunft des Rings.

In Bild 1c stellen wir Strahlen, die die angegebenen Pfade repräsentieren, graphisch dar (HISTORY PLOT). Der dritte Pfad scheint tatsächlich den Ring zu verursachen. Für eine weitergehende Analyse wählen wir nur die Strahlen aus, die den Ring getroffen haben (SELECT), kehren deren Richtung um (REVERSE) und verfolgen sie in einzelnen Raytracingschritten zurück. Bild 1d zeigt die Auftreffpunkte der Strahlen auf dem Reflektor. Die Strahlen treffen offenbar, von der Lichtquelle ausgehend, zunächst den hinteren Teil des Reflektors. Von dort aus laufen sie über den vorderen Teil des Reflektors hin zur Wand. Das Modell der Taschenlampe zeigt exemplarisch ein typisches Problem vieler Beleuchtungssysteme: Störreflexe. Diese können zum Beispiel bei Automobilscheinwerfern zur Blendung des Gegenverkehrs führen. Das vorgestellte Verfahren erlaubt hier eine effiziente Fehleranalyse – den ersten Schritt zur Fehlerbehebung. Aus dem Beispiel ergibt sich eine weitere Fragestellung: Wie könnte man die Wand gleichmäßiger beleuchten, damit kein Ring entsteht? Eine Lösung wäre offenbar, den hinteren Teil des Reflektors einfach abzuschneiden, wodurch natürlich Licht verloren ginge. Sinnvoller wäre es, eine andere Grundform des Reflektors zu wählen. Mittels geeigneter Optimierungsalgorithmen lässt sich eine solche Form finden; mehr dazu in Abschnitt 4.

2 Importance Sampling

Raytracing hat oft mit der Berechnung unnötig vieler Lichtstrahlen zu kämpfen. Als Beispiel zeigt **Bild 2a** einen simplen Aufbau für eine Streulichtmessung. Ein kollimierter Strahl beleuchtet einen Punkt auf einer lichtstreuenden Fläche. Ein Detektor misst das Streulicht unter vorgegebenem Winkel. Raytracer modellieren Streulicht meist mittels "Ray-Splitting": ein einfallender Lichtstrahl erzeugt viele gestreute Strahlen mit zufälliger Richtung, deren Fluss und Verteilungsfunktion man entsprechend der Winkelstreuerecharakteristik der Oberfläche (BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function) wählt. Wenn der Detektor einen Raumwinkel

¹ Bemerkung: Der Halbraum spannt einen Raumwinkel von $3602/2\pi$ auf, das sind rund 20 600 Quadratgrad. In SI-Einheiten entspricht 1 Quadratgrad $(2\pi/360)^2$ sr oder rund 0,00030462 Steradian.

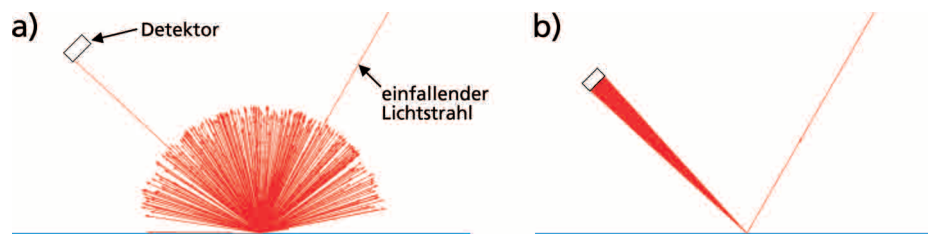


Bild 2: Modellierung des Streulichts. a) Ein einfallender Lichtstrahl erzeugt viele Tochterstrahlen, die in zufällige Richtungen ausgesandt werden. Nur ganz wenige Strahlen treffen den Detektor. b) Bei Importance Sampling werden nur solche Streustrahlen erzeugt, die auf ein vorgegebenes Ziel – hier auf den Detektor – gerichtet sind

von 1° ² aufspannt, dann trifft im Mittel nur jeder 20600ste Strahl den Detektor¹, alle anderen Strahlen gehen verloren und vergeuden lediglich Rechenzeit. So genanntes „Importance Sampling“ bietet hier eine Problemlösung: es werden von vorne herein nur Streu-Strahlen erzeugt, die auf ein gewisses Ziel gerichtet sind – in vorliegenden Fall auf den Detektor. Bild 2b zeigt die gleiche Simulation mit Importance Sampling: alle Streustrahlen treffen nun den Detektor, weil nur solche Strahlen berechnet werden. Bei gleichem statistischen Fehler ist die Rechnung um Größenordnungen schneller – in unserem Fall ca. 1000-mal. In der Praxis ist ein Zeitgewinn um den Faktor 10^{12} und mehr keine Seltenheit.

3 Streulichtanalyse

Bild 3a stellt ein typisches Cassegrain-Teleskop für astronomische Anwendungen dar. Der Tubus sowie die konisch geformte Blende schützen den Detektor (z.B. eine CCD-Kamera) bereits recht gut, aber nicht vollständig, vor Streulicht, das von Quellen außerhalb der Beobachtungsrichtung kommt. In der Realität streuen alle physikalischen Oberflächen Licht – der Tubus, die Spiegel etc. – und so kann Streulicht auf Umwegen immer noch in den Detektor gelangen. Zur quantitativen Berechnung der Streulichtleistung auf dem Detektor mittels normalem Raytracing müsste man mit extrem vielen Strahlen rechnen, da es sehr

unwahrscheinlich ist, dass ein gestreuter Strahl den Detektor trifft. Der Zeitaufwand für eine ausreichend genaue Rechnung läge bei einem handelsüblichen PC, der 10^4 Strahlen pro Sekunde „schafft“, in der Größenordnung einiger tausend Jahre und ist deswegen völlig unpraktikabel. Durch eine trickreiche Kombination mehrerer Raytracingschritte mit Importance Sampling ist es jedoch möglich, die Rechnung bei gleicher numerischer Genauigkeit innerhalb weniger Minuten durchzuführen.

Für die Streulichtanalyse hat sich ein systematisches Verfahren bewährt, das wir im Folgenden vorstellen und das in der Literatur gut dokumentiert ist [1,2]. Es besteht aus einer ganzen Kette von Einzelschritten, die jeweils „kreatives“ Raytracing einsetzen. Wir betrachten eine Störquelle (z.B. den Mond oder eine Straßenbeleuchtung), die unter 60° in das Teleskop strahlt (Bild 3a).

In den ersten beiden Schritten vernachlässigen wir das Streulicht. Wir verfolgen das Licht der Störquelle in das Teleskop und erstellen eine Liste aller Flächen, die direkt oder indirekt (über Spiegel, Linsen etc.) getroffen wurden (TRACE STATS) – die so genannten *beleuchteten* Objekte. Im nächsten Schritt gehen wir umgekehrt vor: wir betrachten den Detektor als Lichtquelle und untersuchen, welche Objekte von den von ihm ausgesendeten Strahlen getroffen werden. Dies sind die Objekte, die im Sichtfeld des Detektors liegen – die so genannten *kritischen* Objekte (Bild 3b).

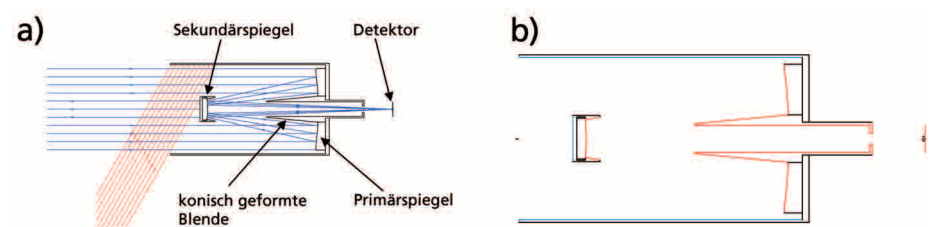


Bild 3: Cassegrain-Teleskop. a) Der Strahlengang des Nutzlichts ist blau eingezeichnet, der der Störquelle rot. Streuung am Tubus ist noch nicht berücksichtigt. b) Die Objekte, die von der Störquelle direkt beleuchtet werden (ohne Streulicht), sind blau eingetragen, diejenigen, die direkt oder über Spiegel im Gesichtsfeld des Detektors liegen (kritische Objekte), rot

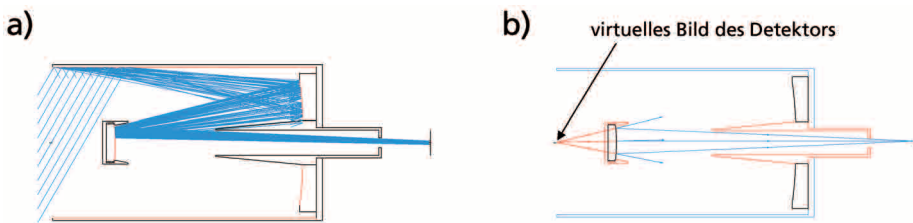


Bild 4: Cassegrain-Teleskop. a) Störlichtpfad, der von der Störquelle über Streuung am Tubus und am Primärspiegel auf den Detektor trifft; b) Konstruktion des virtuellen Bildes des Detektors im Sekundärspiegel

Wenn ein *beleuchtetes* Objekt gleichzeitig *kritisch* ist – das heißt vom Detektor „gesehen“ wird – dann führt bereits Einfachstreuung an diesem Objekt zu einem Signal auf dem Detektor. Dies ist bei unserem Beispiel nicht der Fall, da der Tubus und die konische Blende solches Störlicht bereits abblocken. Wenn jedoch ein beleuchtetes Objekt Licht auf ein kritisches Objekt streut, dann kann es von dort in einem zweiten Streuprozess auf den Detektor gelangen. Die Analyse muss sich deswegen mit solchem Streulicht zweiter Ordnung befassen. Die einzige Chance zur quantitativen Berechnung der Zweifachstreuung in akzeptabler Zeit ist die Verwendung von Importance Sampling.

Exemplarisch stellen wir dies für einen Streulichtpfad dar: „Streuung am Tubus und nochmalige Streuung am Primärspiegel“ (Bild 4a). Zunächst ordnen wir dem Tubus und dem Primärspiegel Streueigenschaften zu, vorzugsweise experimentell ermittelte Daten. Im nächsten Schritt legen wir die Ziele für das Importance Sampling fest. Das vom Tubus gestreute Licht soll auf den Primärspiegel fallen. Diesen geben wir daher als Ziel für das Importance Sampling vor. Das Licht vom Primärspiegel soll über den Sekundärspiegel auf den Detektor gestreut werden. Ein geeignetes Ziel für das Importance Sampling ist daher das *virtuelle Bild* des Detektors im Sekundärspiegel.

Diese virtuelle Bild können wir leicht berechnen – eine weitere Anwendung „kreativen“ Raytracings (Bild 4b): wir setzen eine Lichtquelle an eine Ecke des Detektors. Deren Strahlen verfolgen wir dann bis zur Reflexion am Sekundärspiegel. Die Strahlen zeigen nun in die mit Pfeilen gekennzeichnete Richtung. Für diese Strahlen bestimmen wir den besten Fokus, also den Punkt im Raum, der den geringsten Abstand zu den Strahlen hat. Dieser Punkt bildet eine „Ecke“ des virtuellen Bildes des Detektors, die anderen Ecken konstruieren wir analog. Nun liegen alle Voraussetzungen für eine effiziente Simulation vor, wir können mit dem Raytracing starten. Es werden nun fast nur noch Strahlen der

Störquelle berechnet, die den Detektor erreichen (Bild 4a). Den Störlichtanteil des untersuchten Pfades genau zu berechnen, nimmt nur noch wenige Minuten in Anspruch. Die übrigen Streulichtpfade (die sich aus den verbleibenden Kombinationen von beleuchteten und kritischen Objekten ergeben), lassen sich auf ähnliche Weise untersuchen.

4 Dicke Strahlen

Die Lichtverteilung ausgedehnter Quellen wird in Raytracern meist mit Zufallszahlengeneratoren modelliert. Simulationsergebnisse sind somit mit statistischem Rauschen behaftet. Treffen N Strahlen auf einen Detektor, beträgt der relative statistische Fehler ca. $1/\sqrt{N}$. Um ein Bild mit einer Auflösung von $100 \cdot 100$ Pixeln auf ein Prozent genau zu berechnen, sind also

schon $100^4 = 100$ Millionen Strahlen nötig. Insbesondere bei Optimierungsaufgaben, die ein oftmaliges Wiederholen der Simulation erfordern, verbietet sich eine Simulation mit zu hohen Strahlenzahlen aus Rechenzeitgründen. Abhilfe schafft hier ein wenig bekanntes und wenig genutztes Werkzeug: die Simulation mit „dicken“ Strahlen in ASAP. Dies sind Gauß-Strahlen, wie sie gewöhnlich in der kohärenten Optik eingesetzt werden [1]. Sie lassen sich jedoch ebenso für inkohärente, geometrisch-optische Simulationen verwenden. Die Zerlegung in Gauß-Strahlen hat die Eigenschaft, bis auf eine minimale Restwelligkeit glatte Intensitätsverteilungen zu liefern, unabhängig von der Zahl der verwendeten Strahlen. Mit geringer werdender Strahlenzahl wird das Bild lediglich etwas unschärfer. **Bild 5a** erläutert das Konzept anhand eines sehr einfachen Beispiels. Eine isotrop abstrahlende Lichtquelle sitzt in einem einfachen Reflektor. Mit einer Million normaler („dünner“) Strahlen erhalten wir die Lichtverteilung in Bild 5b, mit 5400 dicken Strahlen die in Bild 5c. Trotz etwa 25-fach niedrigerer Rechenzeit ist die Verteilung in Bild 5c viel glatter. Lediglich einige Details, wie die scharfen Spitzen am Rand, werden durch geringe Auflösung geglättet. Sind diese Details in der Praxis relevant, so könnte man in der Endphase einer Optimierung beispielsweise die Zahl der dicken Strahlen gradu-

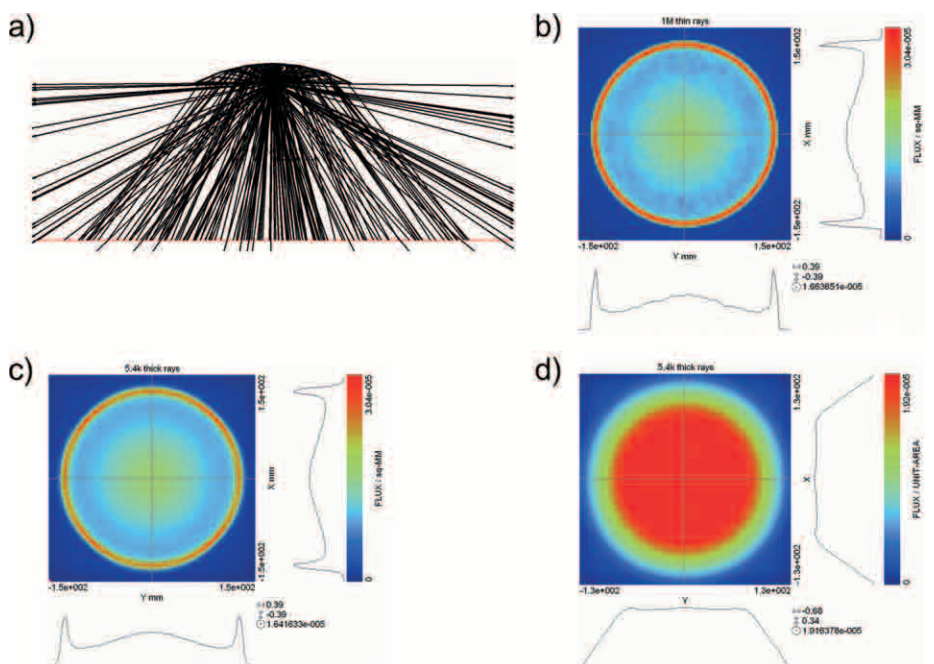


Bild 5: „Dicke“ und „dünne“ Strahlen im Vergleich. a) Isotrop abstrahlende Lichtquelle mit einfachem Reflektor; b) Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Detektorfläche, berechnet mit einer Million dünner Strahlen; c) das gleiche mit nur 5400 dicken Strahlen; d) Optimierung der Reflektorform auf eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke hin: Resultat nach 100 Optimierungsschritten in weniger als 2 Minuten

ell erhöhen, bis auch die feinen Details hinreichend genau erfasst werden. Bild 5d zeigt das Resultat einer solchen Optimierung. Dabei variieren wir drei Parameter des Reflektormodells, und optimieren auf eine gleichmäßige Lichtverteilung hin. Dank Raytracing-Zeiten von weniger als einer Sekunde nahmen die 100 Optimierungsschritte weniger als zwei Minuten in Anspruch. Der wahre Wert solcher Techniken zeigt sich bei komplexeren Systemen mit einer höheren Zahl freier Parameter.

5 Fazit

Raytracing – flexibel und kreativ eingesetzt – hilft, das Verhalten optischer System qualitativ und quantitativ zu untersuchen und zu verstehen. Spezielle Software-Optionen ermöglichen die Bearbeitung von Aufgaben,

die mit konventionellem Raytracing zu zeit- aufwendig oder gar nicht zugänglich sind.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Breault Research Organization für das von Gary L. Peterson erstellte Modell des Cassegrain-Teleskops.

Literaturhinweise:

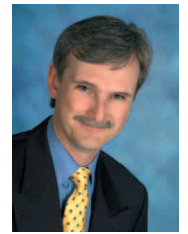
- [1] S. Miller, J. Pond, B. Michel, *Raytracing trifft Maxwell-Gleichungen: Über die Integration von mikro- und makrooptischem Design*, Photonik 6/2005, S. 40-43
- [2] G.L. Peterson, *Stray Light Calculation Methods with Optical Ray Trace Software*, Proc SPIE Vol. 3780, p. 132-137, Sep. 1999
- [3] R.P. Breault, *Control of Stray Light*, in: *Handbook of Optics*, Band 1 (McGraw-Hill, New York, 1995), Kapitel 38

www.photonik.de ▶ Webcode 3001

Ansprechpartner:



Dr. Bernhard Michel



Eberhard Lange

Simuloptics GmbH
 O'Brien Str. 2
 D-91126 Schwabach
 Tel. 09122/830300
 Fax 09122/830303
 eMail: bm@simuloptics.de
 Internet: www.simuloptics.de

OPTATEC: Stand 3.0 B47