

Problemstellung

Bei der Erzeugung realistischer Bilder virtueller Szenen ist die Verwendung spektraler Farbrepräsentationen bedeutend für die Simulation echter Lichtquellen mit ihren Farbspektren. Viele gebräuchliche Bildgeneratoren arbeiten noch immer mit dreikomponentenbasierten Farbrepräsentationen, meistens RGB (rot, grün und blau). Neben der üblicherweise nur in der Form von RGB-Farben verfügbaren Szenenbeschreibung und der auf RGB beschränkten Ausgabe von Computerbildschirmen und Druckern ist der Grund dafür der deutlich höhere Rechenaufwand bei Verwendung spektraler Farbrepräsentationen, da diese mehr Fließkommawerte benötigen. Primäres Ziel ist daher eine flexible Reduktion der Fließkommawerte, wenn möglich individuell für die einzelnen Spektren. *Spectral Mipmapping* soll dies durch Vorausberechnung mehrerer Genauigkeitsstufen für das Spektrum einer Lichtquelle oder eines Reflektors möglich machen. Neben der Effektivität von *Spectral Mipmapping* soll untersucht werden, welche mathematischen Repräsentationen von Farbspektren sinnvoll sind und was bei der Transformation in die jeweilige Repräsentation beachtet werden muss (z.B. Art der Neuabtastung eines punktabgetasteten Spektrums). Die Wahrnehmung des erzeugten Bildes sollte als Qualitätskriterium für eine gezielte Informationsreduktion gelten. Hierfür bietet sich die Berechnung des Farbabstands zwischen den Pixeln eines Referenzbildes und den Pixeln des mittels Spectral Mipmapping berechneten Bildes an. Eine Betrachtung anderer effizienzsteigernder Verfahren wie des *Composite Models*, das speziell zur effizienteren Verarbeitung von Spektren mit Spitzen entwickelt wurde, soll Vergleichswerte liefern.

Grundlegende Erkenntnisse

Eine Abtastrate, die für eine gute Rekonstruktion eines einzelnen Lichtspektrums ausreichend ist, muss nicht ausreichend sein für dessen Repräsentation, nachdem es durch Objekte in der virtuellen Szene moduliert wurde. Ein naheliegendes Qualitätsmaß ist der wahrgenommene Farbabstand zwischen der erzeugten Farbe und einer Vergleichsfarbe. Dieser entspricht etwa der euklidischen Distanz der Farben gemessen im $L^*a^*b^*$ -Farbraum. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Farbabstands unter den ungünstigsten Bedingungen (mehrfache Reflexion an gleichfarbigen Objekten) über mehrere Reflexionen hinweg. Der Verlauf hängt sehr stark von der Form des Spektrums ab, wobei besonders der rot hinterlegte Bereich der ersten Reflexionen bedeutend ist, da die Lichtintensität bis zur fünften Reflexion meistens bereits sehr stark abgenommen hat, oder aber das Spektrum nicht stark moduliert wurde.

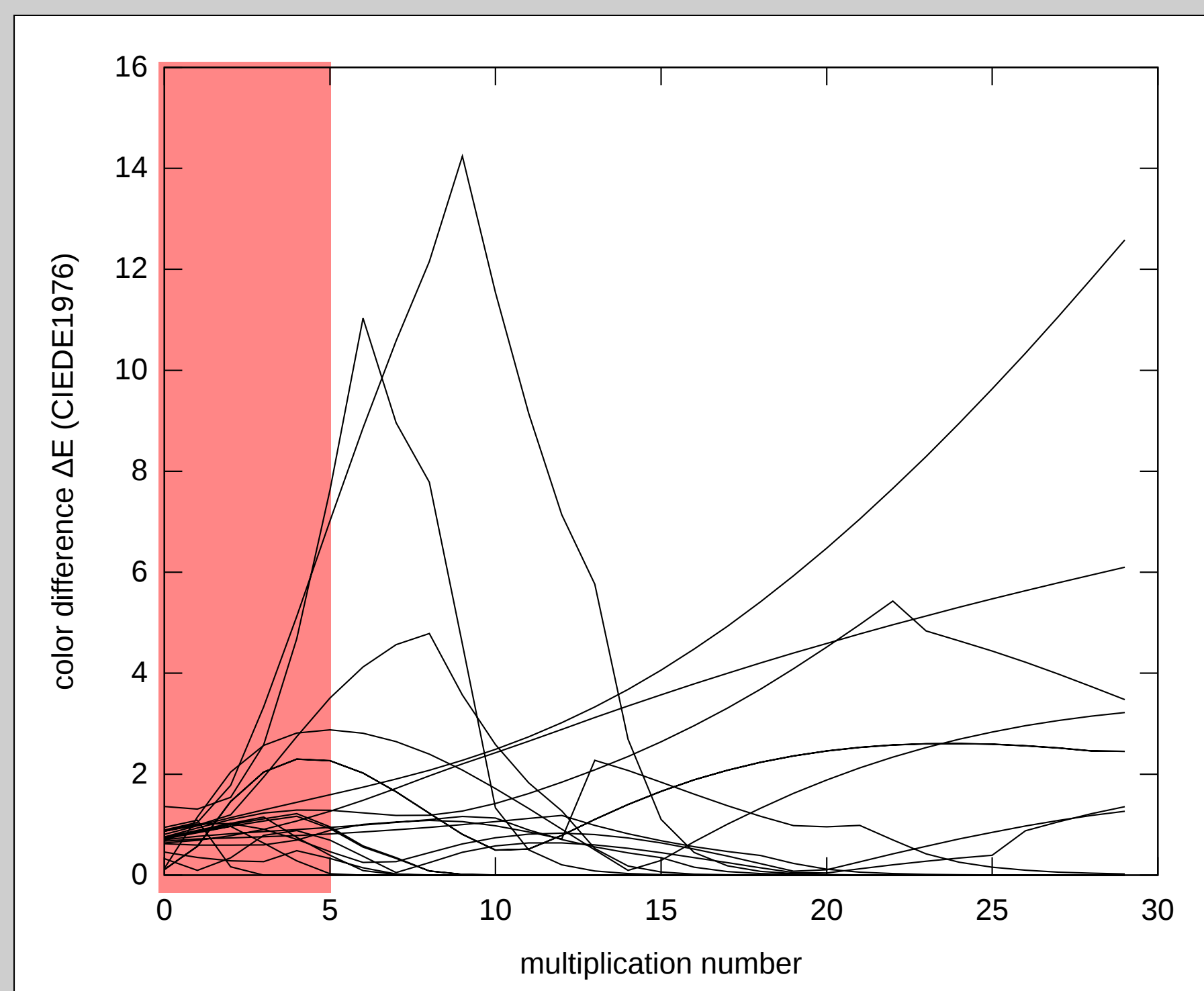


Abbildung 1: Entwicklung des Farbabstands zwischen Testfarbe und Vergleichsfarbe über mehrere Multiplikationen hinweg für mehrere Farben mit unterschiedlichen Spektren

Um sicher gehen zu können, dass eine bestimmte spektrale Farbrepräsentation ausreichend ist, sollte diese anhand von Testmultiplikationen überprüft und anschließend angepasst werden. Die Resultate sind jedoch meistens viel besser als erwartet und es kann daher sinnvoller sein, ein Testbild mit geringer Auflösung zu erzeugen und dieses mit einem Referenzbild zu vergleichen, um den optimalen Kompromiss zu finden. Bei der Verwendung des *Composite Models* gibt es das Problem des Genauigkeitsverlusts in dieser Form nicht, es werden einfach der glatte Anteil des Spektrums und die Spitzen, wenn vorhanden, separat im Speicher gehalten. Dafür beschränkt sich der Einsatz des *Composite Models* auf Spektren mit deutlichen Spitzen.

Resultate Geschwindigkeit

Bei der Maximierung der Berechnungsgeschwindigkeit ist ein bedeutender Faktor die vom Compiler durchgeführte, automatische Optimierung. Einerseits bedeutet das, dass die Wahl des Compilers einen großen Einfluss auf das fertige Programm haben kann. Andererseits sollte bei der Programmierung immer darauf geachtet werden, dem Compiler die Möglichkeit zu geben, seine Optimierungsfähigkeiten auf das Programm anzuwenden, der Quelltext also entsprechend beschaffen sein. Bei der gleichartigen Verarbeitung einer großen Anzahl spektraler Abtastwerte sind Vektoroperationen zwar hilfreich, im Vergleich zu den grundlegenden Compileroptimierungen (Inline-Funktionen, Schleifen ausrollen, ...) aber meist nur von geringem Einfluss. Zuerst ist daher sicherzustellen, dass die grundlegenden Optimierungsmöglichkeiten voll ausgeschöpft sind.

Es ist zu bedenken, dass eine höhere Toleranz betreffend den Farbabstand nicht unbedingt zu einer bedeutend höheren Berechnungsgeschwindigkeit führt. Hervorstreichen ist der wesentliche Einfluss von Optimierungsmaßnahmen, die nicht einem speziellen Verfahren für die Optimierung von Operationen mit spektralen Farbrepräsentationen entstammen: Zwischen der Berechnungsdauer bei einem maximalen Farbabstand von $\Delta E = 1$ und einem maximalen Farbabstand von $\Delta E = 5$ erreicht man eine Verkürzung der Dauer um immerhin 25 %, aber bereits reine Compileroptimierung ohne den Einsatz von Vektoroperationen führt zu einer Reduktion dieser auf weniger als 10 %. Die grüne Linie im Diagramm zeigt den tatsächlichen Farbabstand im resultierenden Bild.

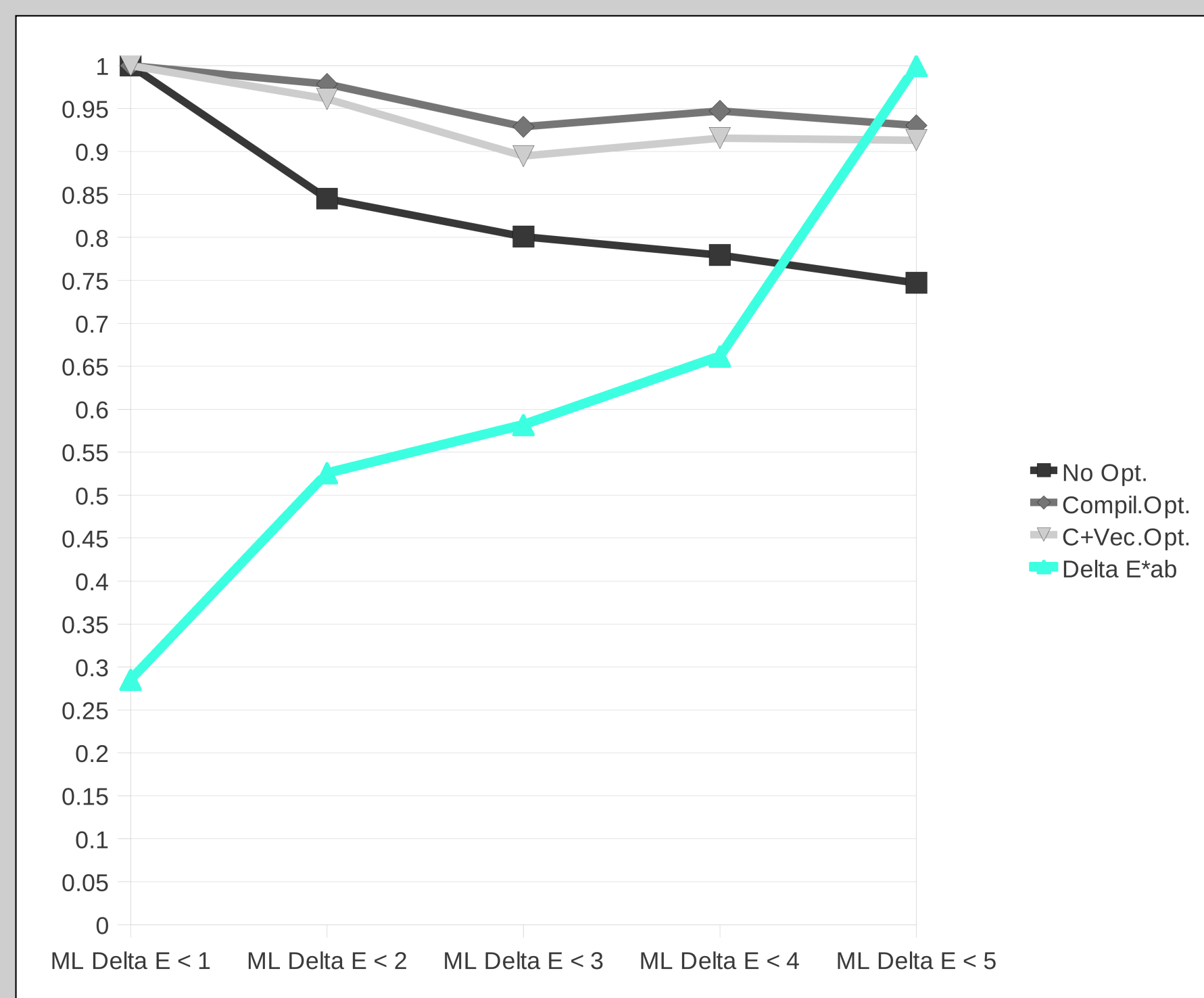


Abbildung 2: Veränderung der Rechendauer (farblose Kurven) und des mittleren Farbabstands zw. Bild und Referenzbild (grüne Kurve) in Abhängigkeit des gewählten maximal erwünschten Farbabstands

Resultate Wahrnehmung

Wenn es darum geht, einen Kompromiss zwischen Darstellungsfehlern bei den Farbtönen und Geschwindigkeit zu finden, kann es von Relevanz sein, wie groß diejenigen Flächen sind, die von den größten Farbabweichungen betroffen sind. Kleinere Flächen stören auch bei Farbabweichungen deutlich über $\Delta E = 2$ nicht. Meistens sind besonders hohe Farbabweichungen auf nur einem geringen Prozentsatz der Pixel zu finden, die Anzahl reicht von einigen Ausreißern bis zu mehreren hundert. Auch hängt die Bedeutung der Farbabweichungen vom Ausgabegerät ab. Ein herkömmlicher PC- oder Fernsehmonitor ist besonders empfindlich in Bereichen, die in allen drei Komponenten hohe RGB-Werte aufweisen. Dunkle Bereiche sind generell weniger anfällig, da durch Berechnungsungenauigkeiten hervorgerufene Farbabweichungen geringer sind. Da besonders Spitzen bei bestimmten Wellenlängen, wie sie beispielsweise in Spektren von Leuchtstoffröhren auftreten, bei einer zu ungenauen Repräsentation eines Spektrums verlorengehen, ist es von Belang, wie stark sich fehlende Spitzen auf das Resultat auswirken. Das oberste Bild zeigt eine Beleuchtung mit Spitzen im Spektrum, das Bild darunter die gleiche Beleuchtung mit abgeschnittenen Spitzen. Im dritten Bild ist der Farbabweichung zwischen den beiden Szenen kodiert. Blau steht für einen geringen Farbabweichung, rot für einen großen.

Auffällig ist der große Farbabweichung an den hellen Stellen und der sehr niedrige Farbabweichung an der linken Wand. Die rote Wand ist zwar wie die Rückwand hell beleuchtet, aber die Spitzen des Lichts befinden sich nicht im energiereichen Wellenlängenbereich des roten Spektrums. Damit ist der Verlust der Spitzen belanglos. Hinzu kommt, dass die Energie des Spektrums durch die Wahrnehmung abhängig von der Wellenlänge unterschiedlich gewichtet wird: Am intensivsten ist die Wahrnehmung in der Mitte des sichtbaren Bereichs.

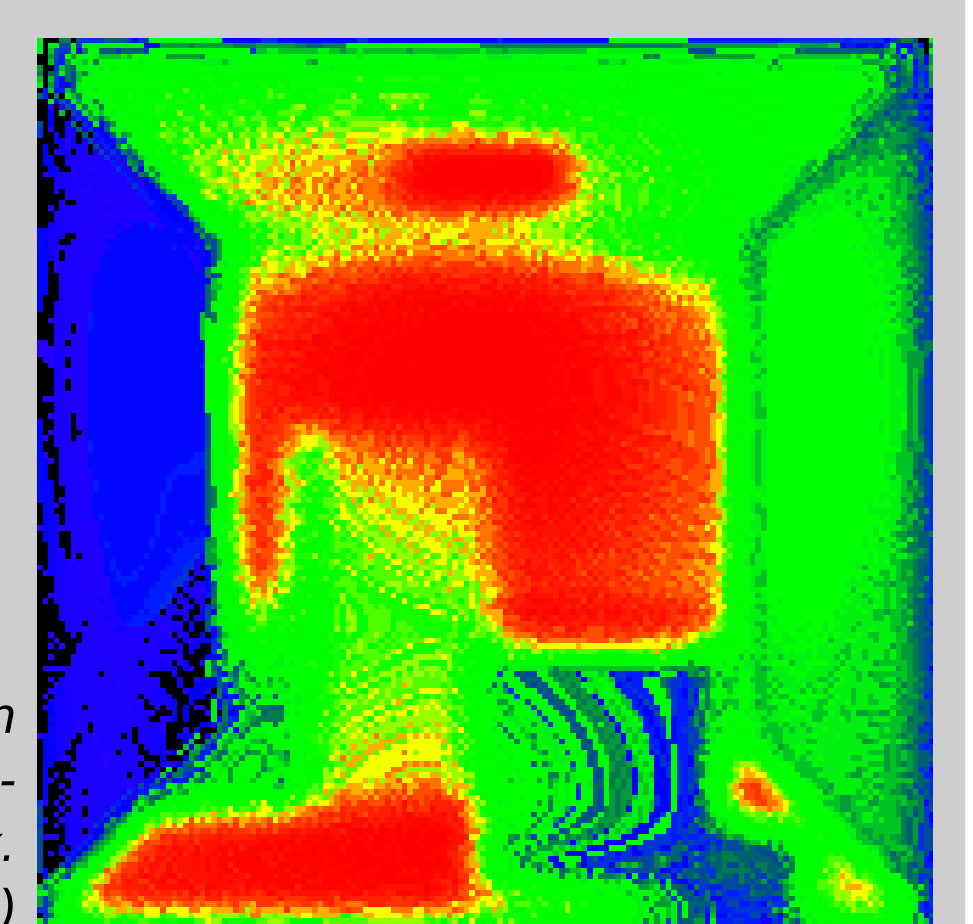
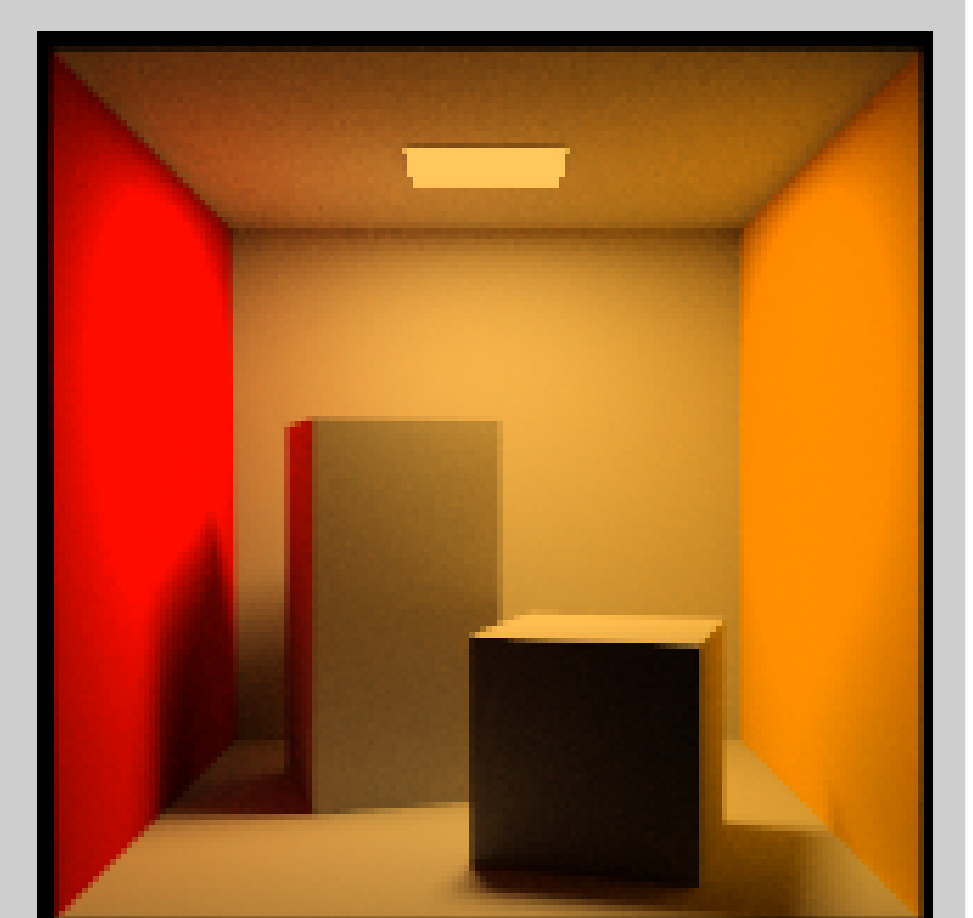
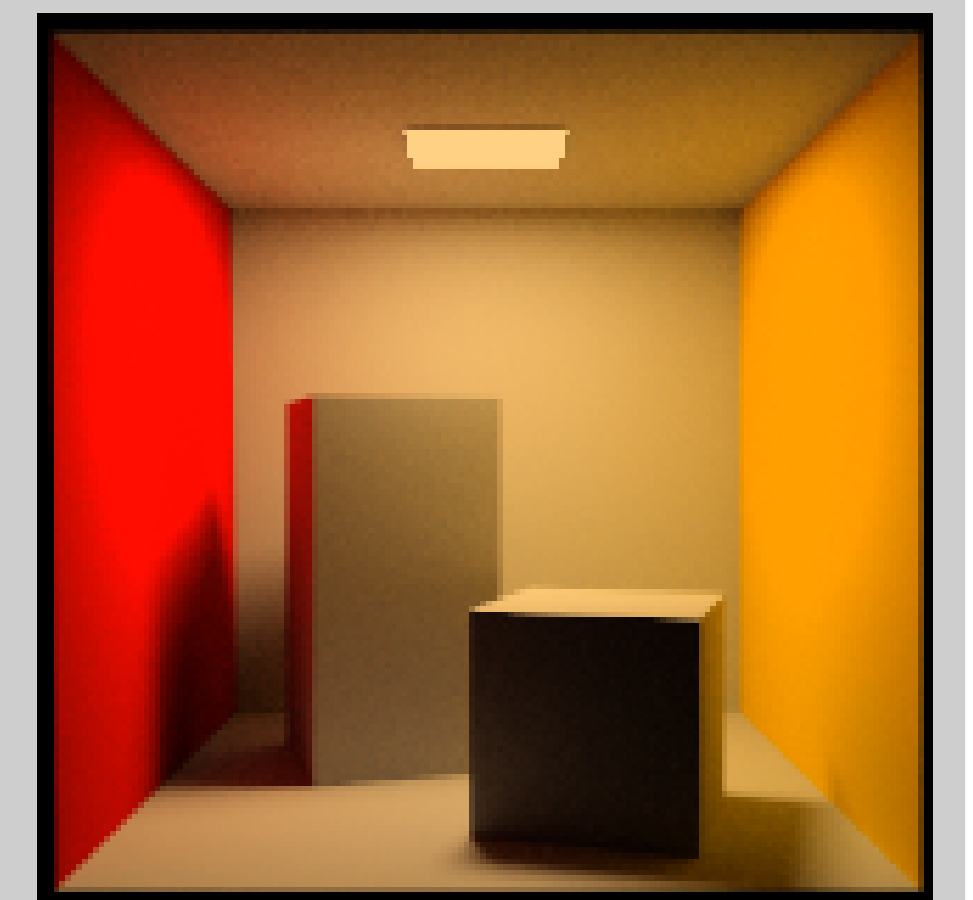


Abbildung 3: Bild mit/ohne Spitzen im Lichtspektrum. Mittlerer Farbabweichung ΔE im Differenzbild: 6.6; max. Farbabweichung: 12.1 (rote Bereiche)

Schlussfolgerungen und Zukunftspotential

Ein sauber entworfener spektraler Bildgenerator, der unter Anwendung geschwindigkeitsoptimierender Programmieretechniken entwickelt wurde, ermöglicht schnelle Operationen auf gesampelten Farbspektren. Die Verbesserung, die man mit Hilfe aggressiver Compileroptimierung erreicht, ergibt eine um 75 % kürzere Rechenzeit oder in günstigen Fällen noch weniger. Eine weitere Optimierung bringt der Einsatz von *Spectral Mipmapping*. Dieser Ansatz kann seine Vorteile besonders bei der Verarbeitung von Szenen mit mehreren unterschiedlichen Lichtquellen einbringen. Er ermöglicht eine Feinabstimmung der Abtastwertdichte pro Spektrum. Der Ansatz des *Composite Models* kann gut mit Spectral Mipmapping konkurrieren und ist etwa gleich effizient. Ein Nachteil könnte in der Untauglichkeit der separaten Spikebehandlung für Vektoroperationen liegen. Dieser macht sich aber in der Praxis bei 4-parallelen Operationen noch nicht bemerkbar. Die Verwendung von *Basisfunktionen* zur Repräsentation von Spektren erfordert den Einsatz von Matrixmultiplikationen und ist daher in Verbindung mit Vektoroperationen mindestens ebenso wenig gewinnbringend, hat sich aber in der Praxis als deutlich schlechter herausgestellt als das *Composite Model*, nicht zuletzt weil die Komplexität bzw. Anzahl der benötigten Basisfunktionen von den Farbspektren einer Szene abhängt.

In weiteren Schritten ist die Integration der Spectral-Mipmapping-Methode in bereits etablierte spektrale Bildgeneratoren wie z.B. *LuxRender* zu überlegen. Die automatische Auswahl der Abtastwertdichte für die Verarbeitung der einzelnen Spektren bedarf noch zahlreicher Verbesserungen. Möglicherweise kann hier ein Klassifikationsalgorithmus, der auf dem Vergleich mit bereits klassifizierten Referenzspektren aus einer Datenbank beruht, den Klassifikationsvorgang ohne nennenswerte Qualitätseinbußen beschleunigen.

Kontakt

Christian Niederreiter
christian.niederreiter@gmx.at
Eschenweg 4
4800 Attnang-Puchheim